

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zvonimir Guzović

Nikola Brajko

Zagreb, 2014.

Izjava

Izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno, koristeći navedenu literaturu i izvore s interneta, te znanje stečeno na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Posebno se zahvaljujem mentoru prof.dr.sc. Zvonimiru Guzoviću na stručnoj pomoći, ustupljenom vremenu i podršci te usmjeravanju u izradi završnog rada.

Zahvaljujem svojoj obitelji na podršci tijekom školovanja.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Nikola Brajko**

Mat. br.: 0035159455

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PARNA TURBINA ZA GEOTERMALNU ELEKTRANU SLATINA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **STEAM TURBINE FOR GEOTHERMAL POWER PLANT SLATINA**

Opis zadatka:

Sve veća tendencija korištenja obnovljivih energetskih izvora prisutna je i kod geotermalne energije. Danas se geotermalna energija sve više koristi za proizvodnju električne energije. U Republici Hrvatskoj postoji nekoliko srednjetermperaturnih geotermalnih polja s relativno visokom temperaturom geotermalne vode, oko 180 °C (Slatina, Molve-2, Kalinovac). Na geotermalnom polju Slatina temperatura geotermalne vode na ušću bušotine je 183 °C, a protok se može pretpostaviti uz uporabu dubinskih pumpi od 100 l/s.

U okviru završnog rada potrebno je:

1. prikazati trenutno stanje u svijetu iskorištavanja geotermalne energije za proizvodnju električne energije kao i raspoloživih tehnologija (tipova elektrana) koje se koriste u tu svrhu;
2. na temelju prethodno provedene analize i usporedbe predložiti moguće tehnologije (tipove elektrana) za proizvodnju električne energije na geotermalnom polju Slatina, provesti termodinamičke proračune potrebne za analizu predloženih mogućih tehnologija, te na temelju proračuna predložiti najpovoljniju tehnologiju odn. tip elektrane;
3. izraditi termodinamički i aerodinamički proračun parne turbine za odabrani tip geotermalne elektrane Slatina;
4. izraditi crtež uzdužnog presjeka turbine.

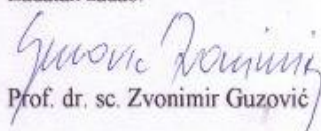
U tekstu završnog rada potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć tijekom izrade.

Zadatak zadan:
11. studenog 2013.

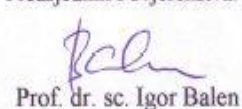
Rok predaje rada:
1. rok: 21. veljače 2014.
2. rok: 12. rujna 2014.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 3., 4. i 5. ožujka 2014.
2. rok: 22., 23. i 24. rujna 2014.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Zvonimir Guzović

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Igor Balen

Sadržaj

Popis slika	I
Popis tablica	II
Popis oznaka.....	III
Sažetak.....	VI
1. Geologija zemlje i geotermalna energija.....	1
1.1 Uvod	1
1.2 Struktura zemlje	1
1.3 Temperaturna raspodjela zemlje.....	3
1.4 Temperaturni gradijent i toplinski tok u Hrvatskoj	3
2. Iskorištavanje geotermalne energije za proizvodnju električne energije	5
2.1 Status korištenja geotermalne energije u svijetu.....	7
2.1.1. Načini korištenja geotermalne energije	7
2.1.2 Izravno korištenje	8
2.1.3. Proizvodnja električne energije.....	10
2.2 Status proizvodnje u Republici Hrvatskoj.....	13
3. Geotermalne elektrane	15
3.1 Geotermalne elektrane sa suhom parom	15
3.1.1 Sustav energetske pretvorbe	15
3.2 Geotermalne elektrane s jednostrukim isparavanjem.....	16
3.2.1 Sustav energetske pretvorbe	17
3.3 Geotermalne elektrane s dvostrukim isparavanjem	18
3.3.1 Sustav energetske pretvorbe	18
3.4 Geotermalne elektrane s binarnim ciklusom	20
3.4.1 Geotermalne elektrane s organskim Rankine-ovim ciklusom (ORC).....	21
3.4.2 Geotermalne elektrane s Kalina ciklusom	21
4. Termodinamički proračuni mogućih tehnologija iskoristivih na geotermalnom polju Slatina	23
4.1 Karakteristike geotermalnog polja Slatina	23
4.1.1 Smještaj grada Slatine	23
4.1.2 Reljefna i geološka obilježja	23
4.1.3 Geotermalni resursi Slatinskog područja	24
4.2 Predloženi tipovi geotermalne elektrane Slatina	25
4.2.1 Proračun geotermalne elektrane s jednostrukim isparavanjem	25
4.2.2 Proračun geotermalne elektrane s dvostrukim isparavanjem	28

4.2.3	Proračun binarne elektrane s ORC ciklusom	32
5.	Proračun turbine	36
5.1.	Proračun prvog stupnja turbine	36
5.2	Rezultati proračuna ostalih stupnjeva.....	48
6.	Zaključak.....	52
PRILOZI	53
LITERATURA	54

Popis slika

- Slika 1. Unutarnja struktura zemlje, slojevi od kojih se sastoji
- Slika 2. Temperaturna raspodjela unutrašnjosti zemlje
- Slika 3. Raspodjela temperaturnog gradijenta u RH
- Slika 4. Geotermalna ležišta u RH
- Slika 5. Tektonske ploče koje čine zemljinu koru
- Slika 6. Načini oslobađanja ploča od naprezanja pri sabijanju i rastezanju
- Slika 7. Pacifički vatreni prsten
- Slika 8. Područja primjene osnovnih tipova geotermalnih elektrana
- Slika 9. Porast instalirane snage proizvodnje geotermalnih elektrana u periodu 1978.-2014. godine kao i kapaciteti u izgradnji
- Slika 10. Prikaz značajnijih geotermalnih lokaliteta u Hrvatskoj
- Slika 11. Toplinska shema ciklusa geotermalne elektrane sa suhozasićenom parom
- Slika 12. T – s dijagram postrojenja sa suhozasićenom parom
- Slika 13. Shema procesa s jednostrukim isparavanjem
- Slika 14. T – s dijagram ciklusa geotermalne elektrane s jednostrukim isparavanjem
- Slika 15. Toplinska shema ciklusa geotermalne elektrane s dvostrukim isparavanjem
- Slika 16. T – s dijagram postrojenja s dvostrukim isparavanjem
- Slika 17. Shema binarne elektrane
- Slika 18. Osnovni termodinamički dijagram Rankineovog ciklusa sa izopentanom kao radnim fluidom
- Slika 19. Fazni dijagram amonijak voda pri tlaku 30 bara
- Slika 20. Toplinska shema Kalina ciklusa
- Slika 21. Smještaj grada Slatine
- Slika 22. p-h dijagram geotermalne elektrane s binarnim ciklusom i lako hlapljivim pentanom
- Slika 23. Ovisnost temperature struja o izmijenjenoj toplini u predgrijaču-isparivaču

Popis tablica

Tablica 1. Klasifikacija geotermalnih resursa

Tablica 2. Tipovi ležišta i tehnologije za iskorištavanje

Tablica 3. Različiti načini izravnog korištenja geotermalne energije i za to potrebne temperature geotermalnog fluida

Tablica 4. Struktura instaliranih kapaciteta geotermalnih elektrana prema tehnologiji

Tablica 5. Instalirana električna snaga geotermalnih elektrana u svijetu

Tablica 6. Korištenje geotermalne energije u Hrvatskoj

Tablica 7. Ukupni toplinski geotermalni energetske potencijal u Hrvatskoj

Tablica 8. Bušotine na širem području grada Slatine

Tablica 9. Usporedba predloženih tehnologija

Tablica 10. Rezultati proračuna turbine

Popis oznaka

a	-	koeficijent kod gubitka zbog vlažnosti u stupnju turbine
a_1, a	m/s	brzina zvuka na izlazu iz statorske rešetke
a_2	m/s	brzina zvuka na izlazu iz rotorske rešetke
b_1	mm	duljina tetive profila statorske rešetke
b_2	mm	duljina tetive profila rotorske rešetke
c, c_p	J/kgK	specifični toplinski kapacitet
\bar{c}	J/kgK	srednji specifični toplinski kapacitet
c_1	m/s	stvarna apsolutna brzina toka pare na izlazu iz statorske rešetke
c_{1t}	m/s	teoretska apsolutna brzina toka pare na izlazu iz statorske rešetke
c_2	m/s	stvarna apsolutna brzina toka pare na izlazu iz rotorske rešetke
D	kg/s	količina pare koja struji kroz stupanj
d_b	m	odabrani promjer brtve
d_{1k}	m	promjer u korijenu statorskih lopatica
d_{1s}	m	srednji promjer statorskih lopatica
d_{2k}	m	promjer u korijenu rotorskih lopatica
d_{2s}	m	srednji promjer rotorskih lopatica
F_1	m ²	potrebna površina izlaznog presjeka statorske rešetke
F_2	m ²	potrebna površina izlaznog presjeka rotorske rešetke
k_v	W/m ² K	ukupni koeficijent prolaza topline sveden na vanjsku površinu cijevi izmjenjivača
l_1	mm	visina statorskih lopatica
l_2	mm	visina rotorskih lopatica
M	-	Machov broj
M_{1t}	-	Machov broj na izlazu iz statorske rešetke
M_{2t}	-	Machov broj na izlazu iz rotorske rešetke
\dot{m}	kg/s	maseni protok
n	min ⁻¹	brzina vrtnje rotora
P	-	pumpa
PW	-	proizvodna bušotina
p	bar	tlak
\dot{Q}	W	Toplinski tok
R_{sr}	%	reaktivnost na srednjem promjeru
S	-	separator

s	J/kgK	specifična entropija
T	K	termodinamička temperatura
\bar{t}_1, \bar{t}_2	-	relativni korak lopatica statorske i rotorske rešetke
t_1, t_2	mm	stvarni korak lopatica statorske i rotorske rešetke
\bar{U}	W/m ² K	ukupni koeficijent prijelaza topline
u_1	m/s	obodna brzina za srednji promjer statorskih lopatica
u_2	m/s	obodna brzina na srednjem promjeru rotorske rešetke
$\left(\frac{u}{c_F}\right)_{\text{opt.}}$	-	optimalni odnos obodne i fiktivne brzine stupnja
v_0	m ³ /kg	specifični volumen pare na ulazu u statorsku rešetku
v_{1t}	m ³ /kg	teoretski specifični volumen pare na izlazu iz statorske rešetke
v_{2t}	m ³ /kg	teoretski specifični volumen pare na izlazu iz rotorske rešetke
\dot{W}_e	W	ukupna električna snaga
w	J/kg	specifični rad (snaga)
w_1	m/s	stvarna relativna brzina toka pare na ulazu u rotorsku rešetku
w_2	m/s	stvarna relativna brzina toka pare na izlazu iz rotorske rešetke
w_{2t}	m/s	teoretska relativna brzina toka pare na izlazu iz rotorsku rešetke
x	kg/kg	sadržaj pare
y_0	kg/kg	sadržaj vlage na ulazu u stupanj
y_2	kg/kg	sadržaj vlage na izlazu iz stupanja
z	-	broj šiljaka brtve
z_1	-	broj lopatica statorske rešetke
z_2	-	broj lopatica rotorske rešetke
α	W/m ² K	koeficijent prijelaza topline
α_u	°	kut ugradnje lopatica statorske rešetke
α_1	°	kut toka pare na izlazu iz statorske rešetke
α_{1E}	°	efektivni izlazni kut profila statorskih lopatica
α_2	°	kut stvarne apsolutne brzine toka pare na izlazu iz rotorske rešetke
β_u	°	kut ugradnje lopatica rotorske rešetke
β_1	°	kut stvarne relativne brzine toka pare na ulazu u rotorsku rešetku
β_2	°	kut stvarne relativne brzine toka pare na izlazu iz rotorske rešetke
β_{2E}	°	potrebni izlazni kut profila lopatice rotorske rešetke

ΔT	K	temperaturna razlika
Δh	kJ/kg	toplinski pad stupnja
Δh_g	kJ/kg	gubitak stupnja
Δh_i	kJ/kg	iskorišteni toplinski pad stupnja
Δl	mm	potrebno prekrivanje između lopatica rotorske i statorske rešetke
Δl_k	mm	prekrivanje u korijenu između lopatica statorske i rotorske rešetke
ε	-	efikasnost
ε_1	-	odnos tlakova na izlazu i ulazu statorske rešetke
ε_1^*	-	kritični odnos tlakova za statorsku rešetku
ε_2	-	odnos tlakova na izlazu i ulazu rotorske rešetke
ε_2^*	-	kritični odnos tlakova za rotorsku rešetku
ζ	-	koeficijent gubitka
ζ_b	-	gubitak uslijed propuštanja kroz međustupanjsku brtvu
η	-	termički stupanj djelovanja
η_i	%	unutarnji stupanj djelovanja
η_u	%	stupanj djelovanja na obodu kola
μ_1	-	koeficijent protoka za statorsku rešetku
μ_2	-	koeficijent protoka za rotorsku rešetku
ρ	kg/m ³	gustoća radnog fluida
σ_b	mm	zazor između brtve i osovine
φ	-	koeficijent brzine statorskih lopatica
ψ	-	koeficijent gubitka brzine u rotorskoj rešetci
ϑ	°C	temperatura
κ	-	izentropski koeficijent radnog fluida

Sažetak

Geotermalna energija kao jedan od obnovljivih izvora energije poznata je već stoljeće, a ljudi se geotermalnom energijom koriste kroz cijelu nam znanu povijest ljudskog roda. U povijesti je najčešće korištena za toplice. Ako uzmemo u obzir probleme s današnjim izvorima energije koji se temelje na fosilnim gorivima te njihovoj ograničenosti zaliha i sigurnosti dobave, brze promjene cijena te štetnosti za okoliš jedna od većih prednosti geotermalne energije je ta što nije štetna za okoliš. Druga prednost su zalihe koje su praktički neograničene. U tome pogledu glavni pravac uporabe je iskorištavanje postojećih poznatih i dostupnih nam resursa, dok se u drugom pogledu treba usredotočiti i na iskorištavanje drugih nam ne iskorištenih i ne otkrivenih izvora geotermalne energije.

U sklopu ovog završnog rada prikazano je trenutno stanje iskorištavanje geotermalne energije u svijetu, te postojeće tehnologije koje je moguće iskoristiti.

Na temelju karakteristika geotermalnog polja Slatina predloženi su i tipovi elektrana primjenjivih na lokaciji. To su postrojenje s jednostrukim isparavanjem, postrojenje s dvostrukim isparavanjem, te binarno postrojenje s organskim Rankinovým ciklusom (ORC). Za sve navedene tipove napravljeni su termodinamički proračuni te je u jednostvanom tabličnom prikazu navedena njihova usporedba.

Odabrani tip elektrane je bio onaj s najvećom termodinamičkom iskoristivosti te je za njega napravljen termodinamički i aerodinamički proračun turbine.

1. Geologija zemlje i geotermalna energija

1.1 Uvod

Naziv geotermalno dolazi od grčkih riječi *geo*, što znači zemlja i *therme*, što znači toplina. Geotermalna energija je toplinska energija koja se stvara u zemljinoj kori polaganim raspadanjem radioaktivnih elemenata, kemijskim reakcijama ili trenjem pri kretanju tektonskih masa. Količina takve energije je tako velika da se može smatrati skoro neiscrpnom, pa je prema tome geotermalna energija obnovljivi izvor energije.

U užem smislu onaj dio energije iz dubina Zemlje koji u obliku vrućeg ili toplog geotermalnog medija/fluida (vode ili pare) dolazi do površine Zemlje i prikladan je za iskorištavanje u izvornom obliku ili za pretvorbu u druge oblike (električnu energiju, toplinu u toplinarskim sustavima i sl.).

Može se pronaći svuda po svijetu, no visoko temperaturna energija koja je potrebna za pogon geotermalnih elektrana je pronađena na relativno malo mjesta. Da bi se shvatili takovi visoko temperaturni geotermalni izvori potrebno se upoznati s određenim geološkim spoznajama.

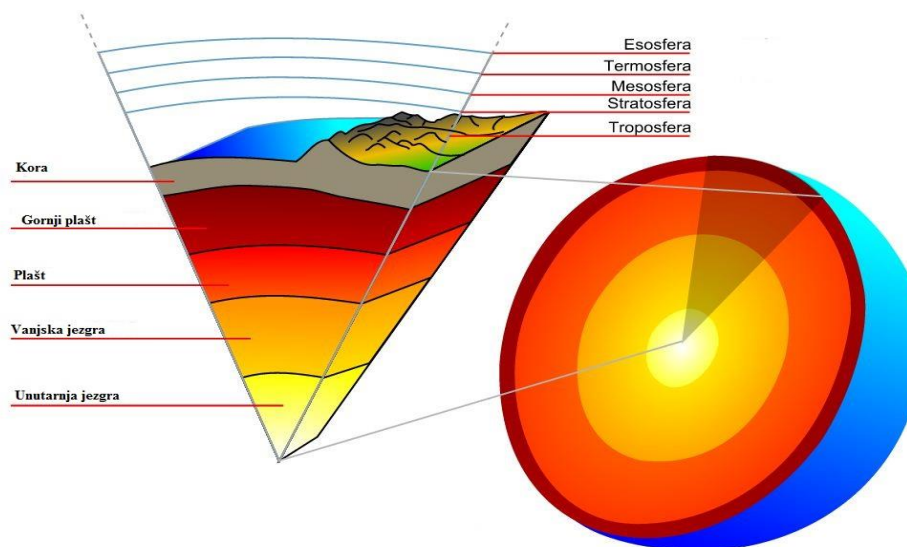
1.2 Struktura zemlje

Čak i danas postoji još mnogo nepoznanica o detaljnoj strukturi zemljine unutrašnjosti. Dok su brojna istraživanja vršena s ciljem upoznavanja Zemljine atmosfere, istovremeno su samo dva – tri projekta bila s ciljem istraživanja njene unutrašnjosti. Problem je u tome što se ta istraživanja temelje na enormno dubokim bušotinama. Jedno od takvih istraživanja bilo je i Moho u čast našem znanstveniku A. Mohorovičiću koji je još davno zamijetio diskontinuitet u brzini seizmičkih valova na određenoj dubini. Zaključio je da to predstavlja granicu između krute kore i rastaljenog plašta. Ta je granica u čast našem znanstveniku nazvana Mohorovičićev diskontinuitet.

Slika 1. prikazuje model zemlje i kao što je vidljivo sastoji se od nekoliko slojeva :

- jezgre koja ima dva sloja: krutu unutarnju čeličnu jezgru i vanjsku jezgru koju čine jako vruće rastaljene stijene, tzv. magma;
- plašta koji okružuje jezgru a sastoji se od magme i stijena;
- kore koja je vanjski sloj Zemlje, te čini kontinente i dno oceana.

Slojevi su nacrtani kao niz koncentričnih sferičnih ljuski. No granice su vjerojatno nepravilne i neizrazite tako da je takav prikaz zemljine unutrašnjosti dosta približan.



Slika 1. Unutarnja struktura zemlje, slojevi od kojih se sastoji[5]

Jezgra, koja se sastoji od dva područja, unutarnje i vanjske jezgre, ima najveću srednju gustoću koja prelazi 10^4 kg/m^3 . Bez obzira na različita gledišta o pojedinim detaljima o sastavu jezgre, danas je općenito prihvaćeno da je najvjerojatniji konstituent željezo–nikal legura. Ipak, zapažene karakteristike jezgre ne slažu se s pretpostavkom da je ona čista željezo–nikal legura.

Plašt okružuje jezgru. Njegova srednja gustoća je $4,5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, što ukazuju da su konstituenti prije stijene nego metali, mada sastav nije u potpunosti utvrđen. Temeljem gustoće, brzine seizmičkih valova i proučavanja stijena za koje se vjeruje da potječu iz plašta, pretpostavlja se da su kisik i silicij dominantni, a od metala su najzastupljeniji ioni magnezija i željeza. Na osnovu svojstava seizmičkih valova, plašt također može biti podijeljen na tri koncentrične ljuske: donji plašt, prijelazno područje i gornji plašt.

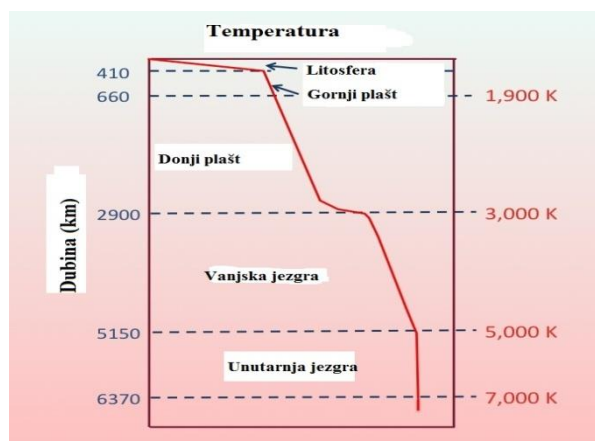
Mohorovičićev diskontinuitet, obično zvan Moho, granica je između Zemljine kore i plašta. Moho sloj odvaja i oceansku i kontinentalnu koru od gornjeg dijela plašta. Većinom se nalazi potpuno u litosferi, samo kod oceanskih hrbata određuje granicu litosfere i astenosfere. Kora ispod oceana je puno tanja, te iznosi 7 – 10 km u prosjeku. Obuhvaća oko 65% ukupne Zemljine površine i prekrivena je u prosjeku s 4 km debelim slojem vode.

Za razliku od relativno uniformne kore ispod oceana, kontinentalna kora varira u debljini od 25 km do 60 km (npr. ispod jako visokih planina), da bi u prosjeku njena debljina iznosila 35 km. Struktura kore je jako složena. Na površini postoji velika raznolikost stijena. One uključuju sedimente, kao glina, pješčenjak ili vapnenac, i prastare štitove koji se sastoje od granita i vulkanske lave. Zemljina kora zauzima samo 2 %, plašt 82 % a jezgra 16 % od ukupnog volumena Zemlje.

1.3 Temperaturna raspodjela zemlje

Zemlja je topla zbog tri uzroka:

- topline formiranja
- topline od hlađenja unutarne jezgre
- radioaktivne topline



Slika 2. Temperaturna raspodjela unutrašnjosti zemlje

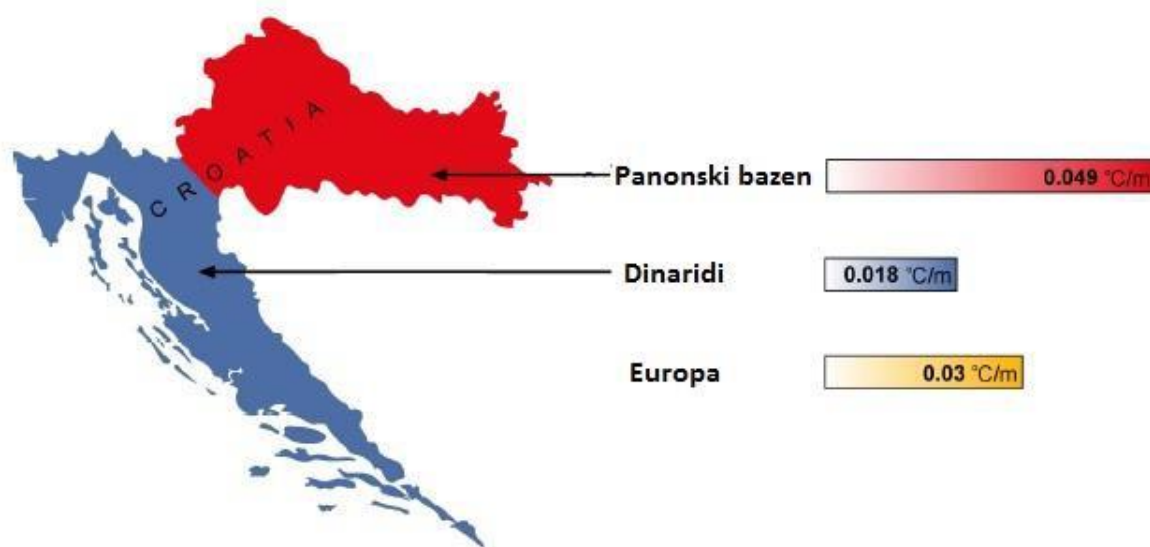
Vjerojatni model temperaturne raspodjele unutar Zemlje prikazan je na sl. 2.. Temelji se na geofizikalnim i petrolozijskim istraživanjima, i njihovom interpretacijom uz korištenje eksperimentalnih istraživanja ponašanja sastavnih minerala plašta i jezgre kod visokih tlakova i temperatura.

Temperatura Zemljine unutrašnjosti raste s povećanjem dubine. Temperatura stijena ispod Zemljine kore na dubini oko 80 do 100 km je između 650 i 1200⁰C. Za područje dubina 100 – 250 km procjena temperature je u području 700 i 1500⁰C. Na dubini od 400 km procjena temperature je u području 1400 do 2000⁰C. Temperature na granici između unutarnje i vanjske jezgre uz tlak oko 330 GPa se procjenjuju u području 5000-5800⁰C, dok je procjena za temperaturu na vrhu vanjske jezgre u području 3500-4700⁰C. Procjenjuje se da je temperatura u središtu jezgre i do 6650⁰C.

1.4 Temperaturni gradijent i toplinski tok u Hrvatskoj

Dva su sedimentna bazena koji pokrivaju gotovo cijelo područje Republike Hrvatske i njihove su karakteristike što se tiče temperaturnog gradijenta i toplinskog toka bitno različite. Možemo ih podijeliti na: Panonski bazen i dinaride. Velike su razlike u geotermalnim potencijalima koji su istraženi istražnim radovima u svrhu pronalaska nafte i plina što je vidljivo iz slike 3.

U Dinaridima prosječni toplinski tok i geotermalni gradijent iznose 29 mW/m^2 i $0,018^\circ\text{C/m}$. Na ovom području se ne mogu očekivati otkrića značajnijih geotermalnih ležišta.



Slika 3. Raspodjela temperaturnog gradijenta u RH [5]

Za razliku od Dinarida, koji nemaju značajnih geotermalnih potencijala u Panonskom bazenu prosječni toplinski tok i geotermalni gradijent su mnogo viši i iznose 76 mW/m^2 i $0,049^\circ\text{C/m}$. Budući da je geotermalni gradijent na panonskom području znatno veći od europskog prosjeka na ovom području se može očekivati, pored već otkrivenih geotermalnih ležišta, pronalaženje novih geotermalnih ležišta.

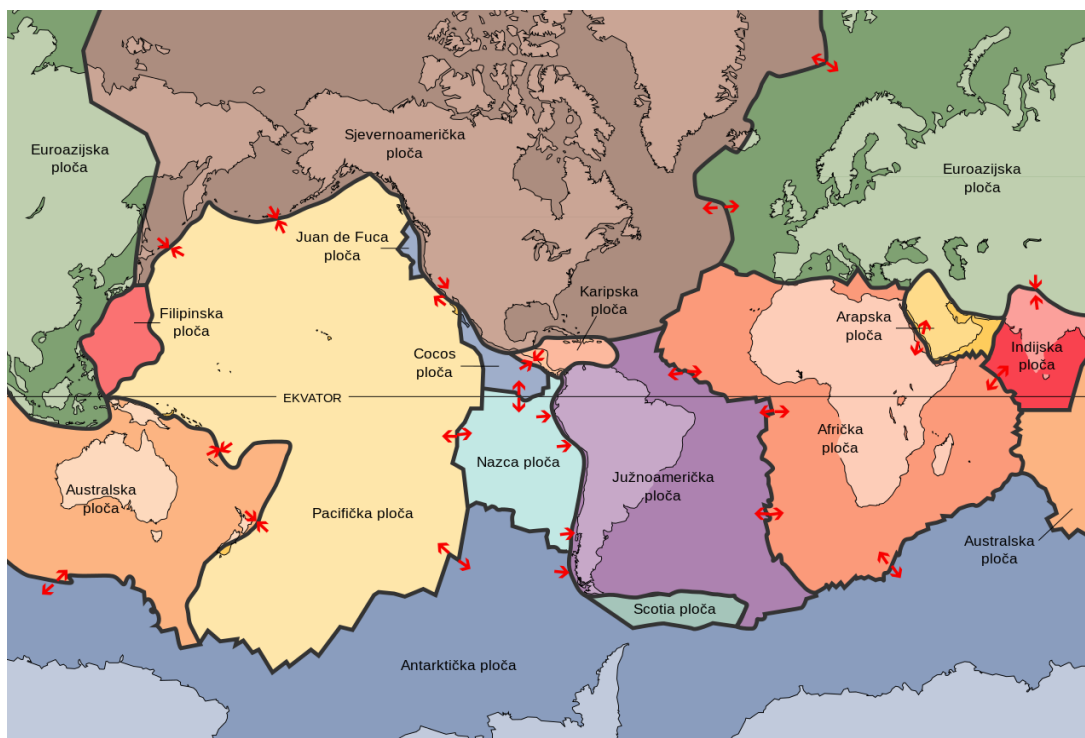
Na temelju podataka iz stvarnih bušotina dubine do nekoliko kilometara poznato je da potencijalni izvori imaju temperature od $40 - 170^\circ\text{C}$. Prema tome procijenjeno je da je ukupni potencijal za proizvodnju električne energije oko 50MW, a za direktno korištenje gotovo 800MW. Na slici 4. Prikazana su do sada poznata geotermalna ležišta u Republici Hrvatskoj.



Slika 4. Geotermalna ležišta u RH [5]

2. Iskorištavanje geotermalne energije za proizvodnju električne energije

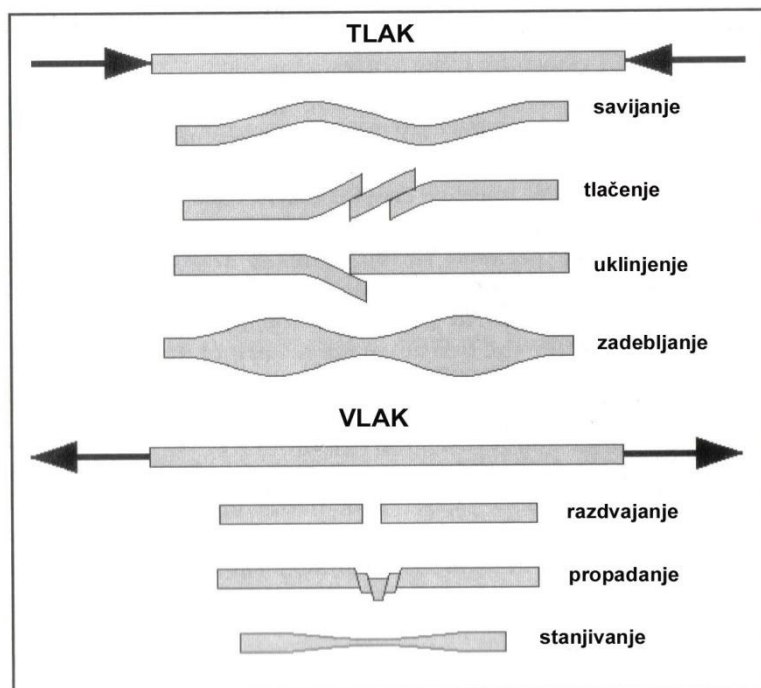
Na samom početku nastanka Zemlje sve kopnene mase su bile spojene u jedan gigantski kontinent nazvan Pangaea, koji gledano u geološkom vremenu je postojao samo jedan trenutak, tako da se nakon njegova raspada Zemljina kora sastoji od velikih tektonskih ploča, *sl. 5*. Kontinenti su dio kore i nalaze se u neprestanom gibanju.



Slika 5. Tektonske ploče koje čine zemljinu koru [6]

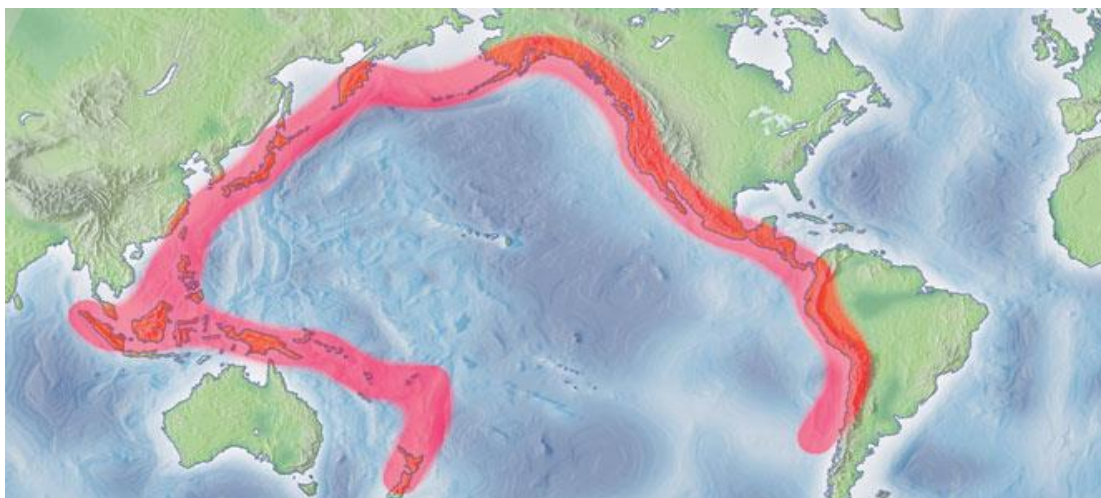
Vanjski dio Zemlje, uključujući koru i područje gornjeg plašta, koji čini krute ploče, je poznat kao litosfera. Dio koji leži ispod litosfere, i vjerojatno se rasprostire na 700 km dubine se zove astenosfera. Za razliku od krute litosfere, materijal u astenosferi je dovoljno vruć da se može deformirati i teći.

U Zemljinoj unutrašnjosti se odvijaju mnogi procesi, tako da ti procesi mogu pomicati tektonske ploče na način da između njih nastaju procijepi, ili pomicati ploče jednu prema drugoj, skraćujući i/ili savijajući ih, kao i skliznuti jedna ispod druge prilikom njihova kontakta. Za posljedicu tih gibanja ploča događaju se razorni zemljotresi ali ta područja su istovremeno i od velikog geotermalnog značaja. Kod gibanja ploča dolazi do njihovog sabijanja ili rastezanja, te se ploče oslobađaju tih naprezanja na načine koji su prikazani *slikom 6*.



Slika 6. Načini oslobađanja ploča od naprezanja pri sabijanju i rastezanju

Kod odmicanja ploča jedne od druge, topli i djelomično rastaljeni materijal iz astenosfere se podiže i popunjava rascjep, i izdiže iz morskog dna. Taj se rastaljeni materijal hladi i postaje dio krutih ploča s obje strane. Uzastopno nadodavanje i hlađenje novog materijala ima za posljedicu nastajanje tzv. srednje-oceanskih grebena, pošto zauzimaju središnje pozicije u Atlantskom i Indijskom oceanu. Za razliku od oceanske litosfere, kod kontinentalne litosfere teško dolazi do subdukcije. Stoga kada su u koliziji dvije kontinentalne ploče dolazi do kompresije i savijanja, što ima za posljedicu nastajanje velikih planinskih lanaca.



Slika 7. Pacifički vatreni prsten

S točke iskorištavanja geotermalnih izvora najviše geotermalnih aktivnosti se događa u području koje se naziva „Pacifički vatreni prsten“ (slika 7.). Ako se uz tu Pacifičku ploču uključe još i dvije susjedne istočne ploče, kao i jedna zapadna uz njih su smještene sljedeće zemlje: SAD, Meksiko, Gvatemala, El Salvador, Honduras, Nikaragva, Costa Rica, Panama, Kolumbija, Ekvador, Peru, Bolivija, Čile, Novi Zeland, Mikronezija, Papua Nova Gvineja, Indonezija, Filipini, Kina, Japan i Rusija. Sve nabrojane zemlje imaju geotermalne resurse pogodne za eksploataciju, a 12 od njih imaju instalirane geotermalne elektrane.

2.1 Status korištenja geotermalne energije u svijetu

2.1.1. Načini korištenja geotermalne energije

Geotermalna energija može se koristiti izravno, tj. bez daljnjih pretvorbi, kao toplina, te se naziva izravnim korištenjem. Nasuprot tome, geotermalna toplina može se pretvoriti u druge oblike energije uz određeni gubitak prilikom pretvorbe. Proizvodnja električne energije zahtjeva pretvorbu u električnu.

Za proizvodnju geotermalne topline koriste se različite tehnologije. One se temelje ili na kondukciji ili na advekciji topline. Kod proizvodnje topline kondukcijom toplina difundira u izolirani podzemni izmjenjivač topline bez bilo kakove promjene tvari. Adveksijska proizvodnja topline se temelji na proizvodnji toplog fluida, uglavnom geotermalne vode, iz podzemnih spremnika na prikladnoj dubini. Ta se tehnika koristi kako za izravno korištenje tako i proizvodnju električne energije iz nisko, srednje i visokotemperaturnih geotermalnih polja, zavisno o temperaturi geotermalnog fluida, tablica 1.

Tablica 1. Klasifikacija geotermalnih resursa [3]

Tip	Resurs	Temperaturno područje, °C	Sadržaj energije
Vodom dominantni	Topla voda	< 100	Nisko-entalpijski
	Vlažna para	100 - 150	Srednje-entalpijski
Parom dominantni	Suha para	> 150	Visoko-entalpijski

Od približno 100 hidrotermalnih sustava diljem Svijeta, manje od 10% su sa suhom parom dominantna ležišta, 60% su s vlažnom parom odn. vodom dominantna ležišta, te 30% ih proizvodi toplu vodu. O vrsti ležišta ovisi i izbor tehnologije za iskorištavanje pri čemu je glavni parametar temperatura kao što se vidi iz tablice 2.

Tablica 2. Tipovi ležišta i tehnologije za iskorištavanje[3]

Temperatura ležišta	Fluid u ležištu	Uobičajena primjena	Uobičajena tehnologija
$> 220^{\circ}\text{C}$	voda ili para	<ul style="list-style-type: none"> • proizvodnja električne energije 	<ul style="list-style-type: none"> • parna turbina (ciklus sa suhom parom ili isparavanjem) • kombinirani ciklus (ciklus sa suhom parom ili isparavanjem i binarni ciklus) • izravno korištenje fluida • izmjenjivač topline • toplinska crpka
$100 - 220^{\circ}\text{C}$	voda	<ul style="list-style-type: none"> • proizvodnja električne energije • izravno korištenje 	<ul style="list-style-type: none"> • binarni ciklus • izravno korištenje fluida • izmjenjivač topline • toplinska crpka
$50 - 150^{\circ}\text{C}$	voda	<ul style="list-style-type: none"> • izravno korištenje 	<ul style="list-style-type: none"> • izravno korištenje fluida • izmjenjivač topline • toplinska crpka

2.1.2 Izravno korištenje

Izravno korištenje geotermalne energije kao što i samo ime kaže se koristi kao toplota bez daljnje pretvorbe u druge oblike energije. U mnogim dijelovima svijeta postoji veliki potencijal za ovakav način korištenja geotermalnih izvora posebno se to odnosi na upotrebu toplinske energije nisko i srednje temperaturnih izvora. Izravno korištenje geotermalne vode je termodinamički efikasnije od pretvorbe u električnu energiju, međutim i tu postoji niz poteškoća od koji je jedna od najvećih ne mogućnost transportiranja na velike udaljenosti zbog postojanja velikih toplinskih gubitaka.

Direktna upotreba toplinske energije iz geotermalnih resursa možemo klasificirati u tri skupine:

1. Privatna i komercijalna upotreba: grijanje prostora, hlađenje prostora, toplinske pumpe; b) voda (pitka, korištenje kao tople ili hladne, kupanje, plivanje i balneološke potrebe rashladna tehnika, otapanje snijega i leda, gospodarenje otpadom i biokonverzija (npr. pridobivanje metana, etanola i drugih kemijskih spojeva pomoću anaerobnog vrenja i fermentacije gradskog krutog otpada uz istovremeno smanjivanje volumena otpada);
2. Poljoprivreda i s njom povezana upotreba: stočarstvo, uzgoj riba, grijanje staklenika, tretman poljoprivrednih proizvoda kao sušenje, fermentacija, gospodarenje otpadom i njegova pretvorba;
3. Industrijska upotreba: obrada pulpe, papira i drveta, u procesima proizvodnje zlata, srebra i drugih minerala, obrada otpadnih voda, proizvodnja dijetamejske i infuzorijske zemlje.

Iz tablice 3. možemo vidjeti različite načine korištenja geotermalne energije i za to potrebne temperature.

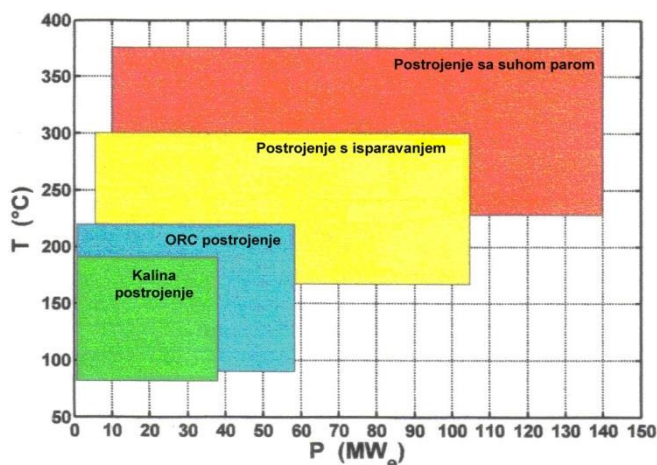
Tablica 3. Različiti načini izravnog korištenja geotermalne energije i za to potrebne temperature geotermalnog fluida[3]

Temperatura, °C	Proces
180	Isparavanje visoko koncentriranih otopina Hlađenje apsorpcijom amonijaka Vrenje pulpe papira
170	Proizvodnja teške vode procesom vodik-sulfid Sušenje dijatomejske i infuzorijske zemlje Vrenje pulpe papira
160	Sušenje ribe u prehrambenoj industriji Sušenje drva
150	Proizvodnja aluminija Bayerovim procesom
140	Sušenje poljoprivrednih proizvoda u velikim količinama Konzerviranje hrane
130	Isparavanje vode u šećeranama Izlučivanje soli isparavanjem i kristalizacijom Dobivanje pitke vode destilacijom
120	Većina kombiniranih isparavanja Koncentracija slanih otopina
110	Sušenje i stvrđivanje cementnih blokova
100	Sušenje organskih materijala (morskog raslinja, trave, povrća, itd.) Pranje i sušenje vune
90	Sušenje bakalara Procesi brzog odleđivanja
80	Grijanje prostora (zgrada i staklenika)
70	Hlađenje (niska temperaturna granica)
60	Stočarstvo Staklenici s kombiniranim grijanjem prostora i zemlje
50	Uzgoj gljiva Balneologija
40	Grijanje tla Bazeni, biorazgradnja, fermentacija
30	Topla voda za grijanje rudnika u hladnim krajevima Odleđivanje Uzgoj riblje mladi i kornjača
20	Uzgoj riba

2.1.3. Proizvodnja električne energije

Proizvodnja mehaničkog rada pomoću geotermalne energije zahtijeva paru za pogon turbina. Ona može biti dobivena kao vlažna ili suha para iz prirodnih ležišta. Ako ne postoje prirodna ležišta pare, para se može također proizvoditi u vrućim suhim stijenama ili tzv. naprednim geotermalnim sustavima. Na nižim temperaturnim razinama, para za pogon turbina može se dobiti posredno isparavanjem fluida s nižom točkom ključanja od vode. Ciklus je poznat kao Organski Rankineov Ciklus (ORC) pošto su na samom početku korišteni organske tvari kao toluol (C_7H_8), pentan (C_5H_{12}), propan (C_3H_8) te ostali ugljikovodici.

Geotermalne elektrane koje se danas nalaze u radu mogu se podijeliti u tri osnovna tipa: postrojenja sa suhom parom, postrojenja s isparavanjem (jednostrukim i dvostrukim) te binarna postrojenja. Koji tip postrojenja će biti instaliran zavisi o vrsti ležišta. Iz slike 8. vidimo područja primjene osnovnih tipova geotermalnih elektrana zavisno o jediničnoj snazi i temperaturi ležišta.



Slika 8. Područja primjene osnovnih tipova geotermalnih elektrana

Sa suhom parom dominantna geotermalna ležišta proizvode suhu paru uz neznatnu količinu vode. Takova se para direktno odvodi u geotermalnu elektranu sa suhom parom gdje ekspandira u turbini obavljajući korisni mehanički rad za pogon električnog generatora. Nakon obavljene ekspanzije para se kondenzira u kondenzatoru a nastali kondenzat može se koristiti u rashladnom sustavu elektrane i utiskivati nazad u ležište nadoknađujući vodu i održavajući tlak ležišta.

Za proizvodnju električne energije iz toplom vodom dominantnih geotermalnih ležišta koriste se geotermalne elektrane s jednostrukim ili dvostrukim isparavanjem. Topla voda isparava u jednom ili dva isparivača, a nastala para se odvodi na ekspanziju u jednu ili dvije turbine.

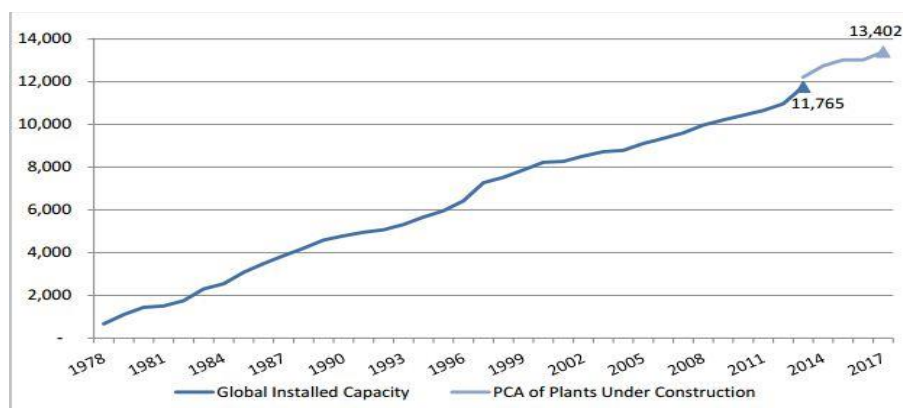
Srednje i niskotemperaturna geotermalna ležišta s temperaturama između 85 i 150°C nisu dovoljno topla za isparavanje, ali se mogu koristiti za proizvodnju električne energije u binarnim geotermalnim elektranama s Organskim Rankineovim Ciklusom. Kod binarnog postrojenja, geotermalni fluid prolazi kroz izmjenjivač topline, gdje se njegova toplota prenosi na binarni fluid s niskom točkom ključanja. Zagrijavanjem binarni fluid prelazi u paru koja ekspandira u turbini. Para nakon ekspanzije se odvodi u kondenzator, a nastali kondenzat se pomoću cirkulacijske pumpe vraća ponovo u izmjenjivač topline. Za razliku od prije navedenih elektrana sa suhom parom i isparavanjem u ovom slučaju geotermalni fluid ne dolazi u kontakt s elementima turbine.

Tablica 4. prikazuje strukturu instaliranih kapaciteta geotermalnih elektrana prema tehnologiji. Dvije trećine svih instaliranih elektrana su elektrane s jednostrukim isparavanjem i elektrane koje koriste suhu paru. Binarne elektrane su relativno još slabo zastupljene, no u posljednje vrijeme njihov se udjel povećava.

Tablica 4. Struktura instaliranih kapaciteta geotermalnih elektrana prema tehnologiji[3]

Tip elektrane	Instalirana snaga, MW	Udjel, %
Suha para	2 545	28,6
S jednostrukim isparavanjem	3 296	37,0
S dvostrukim isparavanjem	2 268	25,4
Binarna/kombinirana/hibridna	685	7,7
Protutlačna	118	1,3
UKUPNO	8 912	100,0

Iako je proizvodnja električne energije pomoću geotermalne poznata već više od stoljeća razvijte tehnologije tekao je sporo, prva geotermalna elektrana stavljena je u pogon početkom 20. stoljeća u Italiji s kapacitetom od 250kW tek pola stoljeća kasnije pojavljuju se novo instalirane elektrane na Novom Zelandu, Meksiku, SAD-u. Te zemlje su i postale središte proizvodnje električne energije iz geotermalne, međutim sve je više i novih središta proizvodnje naročito u Aziji i Srednjoj Americi. Na slici 9. Vidljiv je porast instaliranih kapaciteta u MW od 1978. do danas kao i elektrane u izgradnji.



Slika 9. Porast instalirane snage proizvodnje geotermalnih elektrana u periodu 1978.-2014. godine kao i kapaciteti u izgradnji

Tablica 5. Prikazuje instalirane kapacitete geotermalnih elektrana u 24 zemlje svijeta kao i povećanje instaliranih kapaciteta od 2007. do 2013. godine.

Tablica 5. Instalirana električna snaga geotermalnih elektrana u svijetu

Zemlja	Kapacitet(MW) 2007.	Kapacitet(MW) 2010.	Kapacitet(MW) 2013.	Postotak u nacionalnoj proizvodnji el. en.
SAD	2687	3086	3389	0.3
Filipini	1969.7	1904	1894	27
Indonezija	992	1197	1333	3.7
Meksiko	953	958	980	3.0
Italija	810.5	843	901	1.5
Novi Zeland	471.6	628	895	13.6
Island	421.2	575	664	30
Japan	535.2	536	537	0.1
Kenija	128.8	167	215	11.2
Kostarika	162.5	166	208	14
El Salvador	204.4	204	204	25
Turska	38	82	163	0.3
Nikaragva	87.4	88	104	10
Rusija	79	82	97	
Papua Nova G.	56	56	56	
Gvatemala	53	52	42	
Portugal	23	29	28	
Kina	27.8	24	27	
Francuska	14.7	16	15	
Etiopija	7.3	7.3	8	
Njemačka	8.4	6.6	13	
Austrija	1.1	1.4	1	
Australija	0.2	1.1	1	
Tajland	0.3	0.3	0.3	
UKUPNO	9 731.9	10 709.7	11 765	

Kao što je vidljivo iz tablice napredak u proizvodnji električne energije je u porastu priključivanjem drugih zemalja u razvoju napredak će biti još vidljiviji. Za razliku od direktne upotrebe geotermalne energije proizvodnja el.en nije koncentrirana u zemljama s umjerenom ili hladnom klimom već je raspodijeljena prema raspoloživim resursima pare i vruće vode. Danas u zemljama s rastućom ekonomijom i zemljama u razvoju proizvodnja električne energije pomoću geotermalne pomaže cjelokupnom industrijskom razvoju. Tablica 4. također pokazuje doprinos geotermalne proizvodnje električne energije u cjelokupnoj proizvodnji

električne energije i instaliranim kapacitetima za proizvodnju električne energije u 2013 godini na nacionalnoj razini. Ovdje je Island jedina od razvijenih zemalja među vodećih pet obzirom na oba kriterija, ostale su zemlje u razvoju ili s rastućim ekonomijama.

2.2 Status proizvodnje u Republici Hrvatskoj

U Hrvatskoj postoji višestoljetna tradicija iskorištavanja geotermalnih izvora u medicinske svrhe i kupanje. Geotermalna energija je osnova na kojem se zasniva brojni uspjeh toplica u RH (Varaždinske, Daruvarske, Stubičke toplice, Lipik, Topusko itd.). Proizvodnja geotermalne vode za navedene toplice prije se vršila kroz prirodne izvore dok se danas koriste plitke bušotine. U tablici 6. dan je pregleda korištenja geotermalne energije u Hrvatskoj.

Tablica 6. Korištenje geotermalne energije u Hrvatskoj[3]

Lokacija	Način korištenja	Maksimalne mogućnosti korištenja			Toplinska snaga, MW	Ostvareni proizvodni parametri		
		Protok	Temperatura, °C			Prosječni protok, l/s	Proizvodnja topline, TJ/god	Faktor iskorištenja
			Ulaz	Izlaz				
Topusko	grijanje + kupanje	124,5	62,0	19,7	22,0	31,3	174,6	0,251
Stubičke toplice	grijanje + kupanje	95,0	53,4	10,1	17,2	3,7	21,1	0,039
Zagreb (Mladost)	grijanje + kupanje	50,0	80,0	10,5	14,5	6,6	60,5	0,132
Zlatar	kupanje	220,0	32,0	19,4	11,6	1,7	2,8	0,008
Krapinske toplice	grijanje + kupanje	70,0	41,0	9,8	9,1	5,4	22,2	0,077
Bizovac	grijanje + kupanje	26,0	90,7	11,0	8,7	5,1	53,6	0,196
Tuhelj	kupanje	75,0	32,0	10,0	6,9	75,0	217,6	1,000
Zagreb (SB)	grijanje	55,0	80,0	50,0	6,9	1,6	6,3	0,029
Varaždinske Toplice	grijanje + kupanje	27,0	58,0	10,0	5,4	5,3	33,5	0,196
Daruvar	kupanje	18,0	47,0	10,8	2,7	5,5	26,3	0,305
Zelina	kupanje	30,0	40,0	20,2	2,5	3,0	7,8	0,100
Lipik	grijanje + kupanje	8,3	61,0	10,7	1,7	4,5	29,8	0,542
Samobor (Šmidhen)	kupanje	30,0	28,0	20,2	1,0	4,0	4,1	0,133
Velika (toplic)	kupanje	35,0	25,0	20,0	0,7	8,8	5,8	0,251
Ivanić Grad	kupanje	2,7	62,0	10,8	0,6	1,3	8,8	0,481
Livade (toplice)	kupanje	2,0	28,0	11,3	0,1	0,7	1,5	0,350
UKUPNO		927,0			113,9	168,7	681,6	0,190

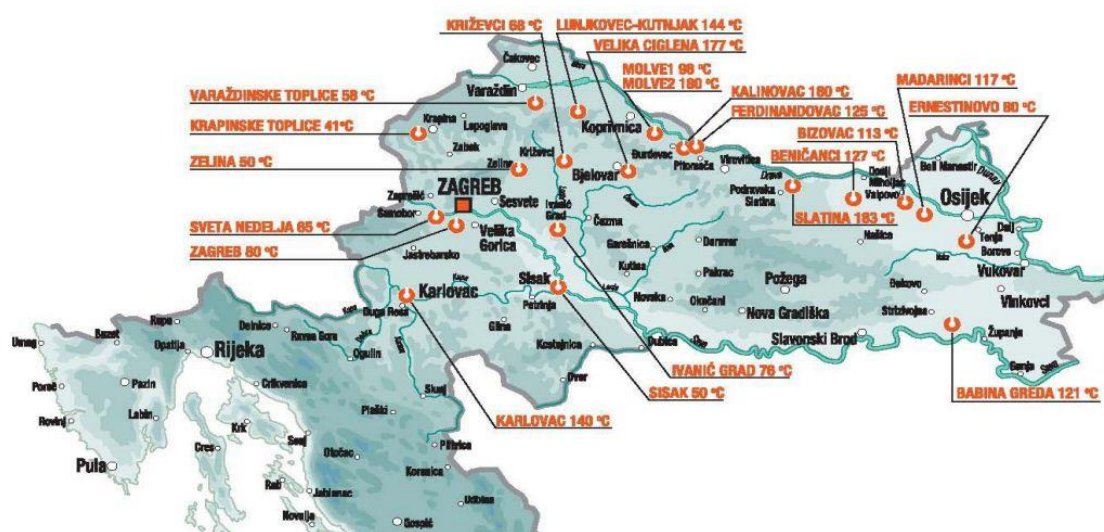
Geotermalni potencijali u Hrvatskoj mogu se podijeliti u tri skupine – srednjemetemperaturna ležišta: 100 – 200 °C, niskotemperaturna ležišta: 65 do 100°C i geotermalni izvori temperature vode ispod 65 °C.

Ukupni toplinski geotermalni energetske potencijal iz sve tri skupine prikazan je u tablici 7.

Tablica 7. Ukupni toplinski geotermalni energetska potencijal u Hrvatskoj[3]

MW (toplinska snaga)	do 50 ⁰ C	do 25 ⁰ C
Iz već izrađenih bušotina	203,47	319,21
Uz potpunu razradu ležišta	839,14	1169,97

Geotermalna energija iz srednjeterapeuturnih ležišta može se iskorištavati za grijanje prostora, u različitim tehnološkim procesima te za proizvodnju električne energije binarnim ciklusom. Geotermalna energija iz niskotemperaturnih ležišta može se iskorištavati za grijanje prostora, tople sanitarne vode, za rekreaciju te u različitim tehnološkim procesima. Na slici 10 su prikazani značajniji geotermalni lokaliteti u RH.



Slika 10. Prikaz značajnijih geotermalnih lokaliteta u Hrvatskoj[4]

3. Geotermalne elektrane

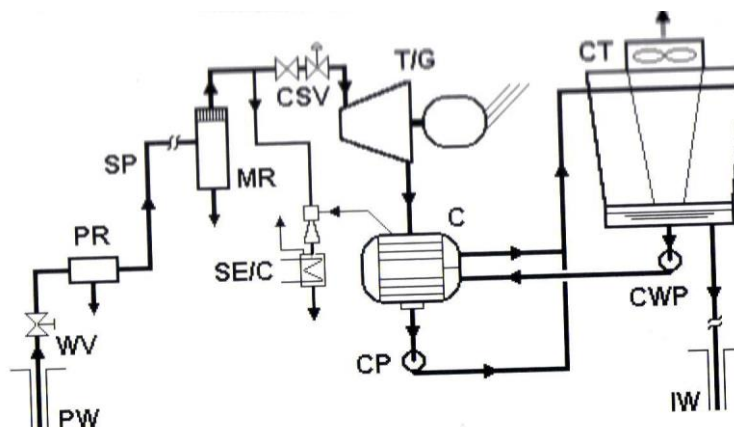
3.1 Geotermalne elektrane sa suhom parom

Postrojenja sa suhom parom su prve geotermalne elektrane koje su postigle komercijalnu isplativost. Prvo ovakvo postrojenje je izgrađeno 1904. godine u mjestu Larderello u Toskani u Italiji. Ovakav tip geotermalne elektrane koristi suhozasićenu ili pregrijanu paru s tlakovima koji su viši od atmosferskog tlaka, izravno iz ležišta bogatog parom. Ležišta Larderello u Italiji i The Geysers u Kaliforniji u SAD-u najveća su ležišta sa suhom parom u svijetu. Ukupno instalirana snaga postrojenja sa suhom parom u 2010. godini iznosila je 2822 MW što predstavlja 25,9% ukupne svjetske instalirane snage iz geotermalnih postrojenja. U cijelom svijetu je do 2010. godine izgrađeno 61 postrojenje sa suhom parom. Prosječna snaga postrojenja sa suhom parom je 46,3 MW. Ova tehnologija je dobro razvijena i komercijalno isplativa, ali su izvori sa suhom parom ili s parom s niskim stupnjem vlage dosta rijetki.

Postrojenja sa suhom parom koriste suhozasićenu ili pregrijanu paru pri tlakovima poverh atmosferskog iz ležišta kod kojih je dominantna para, izrazito povoljni resurs koji se direktno može dovoditi u turbinu za proizvodnju električne energije. Kod postrojenja koja koriste suhu paru, para se može direktno iz proizvodne bušotine dovoditi u turbinu i nakon ekspanzije ispuštati u atmosferu. Takovi direktni ciklus bez kondenzacije je najjednostavnija i najjeftinija opcija za proizvodnju električne energije iz geotermalne energije. Para iz proizvodne bušotine se jednostavno pušta kroz turbinu i ispušta u atmosferu: tj. na izlazu iz turbine ne postoji kondenzator. Kod postrojenja s kondenzacijom para se kondenzira na izlazu iz turbine i hladi u konvencionalnim rashladnim tornjevima. Kondenzacijom pare na izlazu iz turbine ostvaruje se vakuum od 150 hPa (manje od 15% od atmosferskog tlaka), što povećava toplinski pad (istovremeno i pad tlaka) turbine a time i izlaznu snagu. Na taj način, kondenzacijska postrojenja troše bitno manje (oko 50 %) pare nego postrojenja bez kondenzacije.

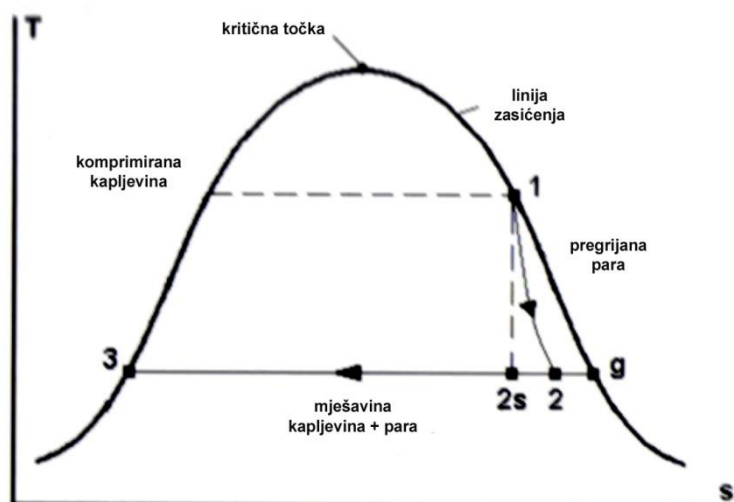
3.1.1 Sustav energetske pretvorbe

Visokotlačna para iz proizvodne bušotine se dovodi u turbinu gdje ekspandira stvarajući mehanički rad koji se u električnom generatoru pretvara u električnu energiju. Para nakon ekspanzije se odvodi u kondenzator gdje dolazi do kondenzacije pare. Nastali kondenzat se može koristiti u rashladnom sustavu elektrane ili utisnuti ponovno u ležište. Slika 11. pokazuje pojednostavljenu toplinsku shemu ciklusa geotermalne elektrane sa suhozasićenom parom, dok slika 12. Pokazuje T-s dijagram postrojenja sa suhozasićenom parom.



Slika 11. Toplinska shema ciklusa geotermalne elektrane sa suhozasićenom parom[1]

Pošto radna bušotina proizvodi suhozasićenu paru, početna točka (stanje 1) je na liniji zasićenja pare. Ako je para pregrijana, točka 1 se pomiče nešto udesno. Proces ekspanzije u turbini 1 – 2 daje manje snage nego idealni, izentropski proces 1 – 2s. Toplina se odvodi u okoliš u kondenzatoru preko rashladne vode procesom 2 – 3.



Slika 12. $T-s$ dijagram postrojenja sa suhozasićenom parom[1]

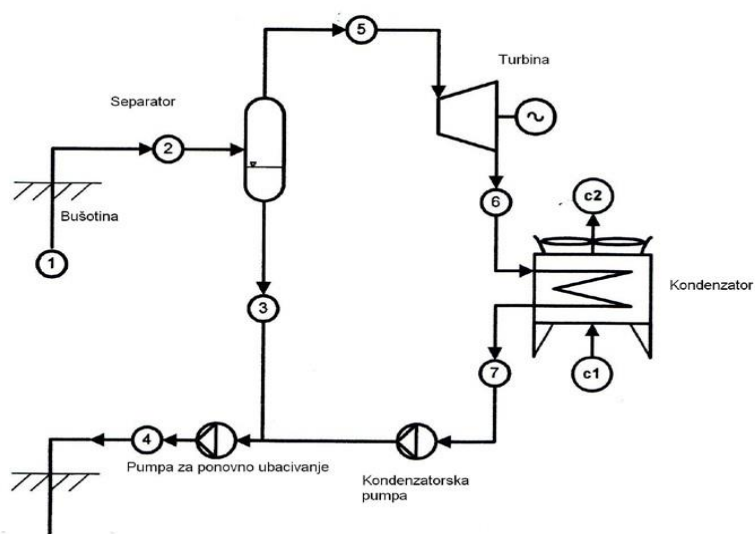
3.2 Geotermalne elektrane s jednostrukim isparavanjem

Geotermalne elektrane s isparavanjem koriste s vodom dominantna ležišta vlažne pare, kod kojih je većina visoko temperaturnog geotermalnog resursa pribavljena vodom pod tlakom. Ta su ležišta puno jednostavnija od onih gdje je para dominantna. Na površini se često manifestiraju kao ključajući izvori i gejziri.

Kada bušotina penetrira u takovo ležište, voda pod tlakom struji u bušotinu pošto je tlak u bušotini općenito niži od tlaka u ležištu. Kao posljedica pada tlaka, određeni dio kapljevine isparava i bušotina istovremeno daje toplu vodu i paru, s tim da je voda dominantna faza. Stoga se ta ležišta također nazivaju i ležišta s vlažnom parom. Vlažna para se ne može koristiti kod standardnih turbina bez rizika oštećenja turbinskih lopatica. Stoga se, kod svih instalacija koje koriste ležišta vlažne pare koriste separatori za odvajanje pare od vode. Isparavanje fluida se vrši u isparavačima na površini, a postrojenja s isparavanjem mogu biti s jednostrukim, dvostrukim ili trostrukim isparavanjem. Od svih geotermalnih elektrana najbrojnije su one s jednostrukim isparavanjem. Takva postrojenja čine 29 % svih geotermalnih postrojenja i oko 40 % ukupno instaliranih geotermalnih kapaciteta u svijetu. Snage ovih postrojenja se kreću između 3 i 90 MW.

3.2.1 Sustav energetske pretvorbe

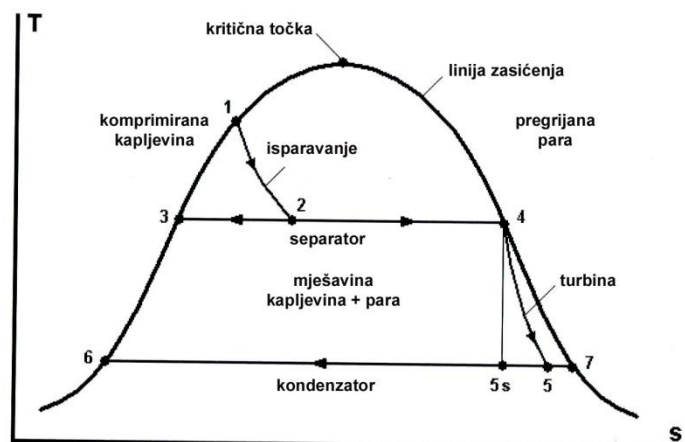
Sustav s jednostrukim isparavanjem ukazuje da je geotermalni fluid podvrgnut jednostrukom procesu isparavanja, tj. procesu prijelaza iz kapljevine pod tlakom u mješavinu kapljevine i pare, kao rezultat pada tlaka geotermalnog fluida ispod tlaka zasićenja koji odgovara temperaturi fluida. Na slici 13. dan je prikaz sheme procesa s jednostrukim isparavanjem.



Slika 13. Shema procesa s jednostrukim isparavanjem [1]

Geotermalni fluid ulazi u bušotinu na izvoru sa svojom ulaznom temperaturom (stanje 1). Zbog gubitka tlaka u bušotini fluid počinje isparavati (stanje 2) te zatim ulazi u separator. Voda iz separatora (stanje 3) se ponovno ubrizgava u ležište (stanje 4). Para iz separatora ulazi u turbinu (stanje 5) i ekspandira. Nakon izlaska iz turbine (stanje 6) para ulazi u kondenzator i poprima tlak kondenzatora. Kondenzator prikazan na slici 20. je hlađen zrakom, pri čemu zrak za hlađenje ulazi u točki c1 i izlazi u točki c2. Fluid se ponovno ubrizgava u

ležište (stanje 4). Nadalje na slici 14. je prikazan proces koji izvodi geotermalni fluid u T-s dijagramu.



Slika 14. T – s dijagram ciklusa geotermalne elektrane s jednostrukim isparavanjem[1]

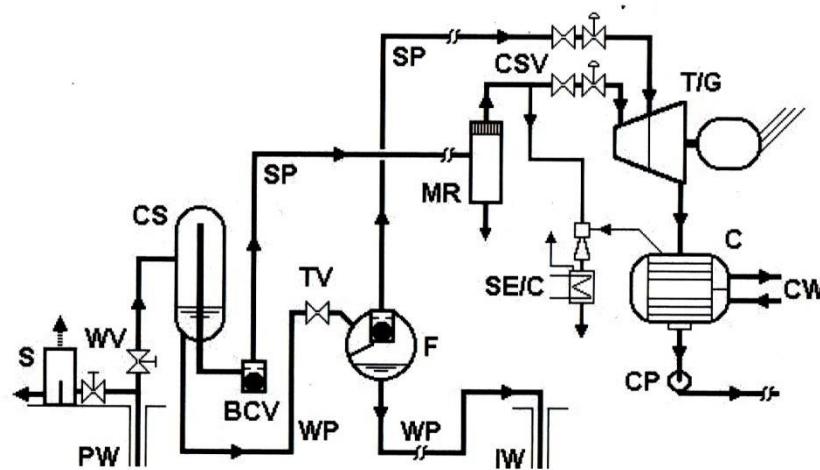
3.3 Geotermalne elektrane s dvostrukim isparavanjem

Postrojenje s dvostrukim isparavanjem predstavlja poboljšanje s obzirom na postrojenje s jednostrukim isparavanjem u tom smislu da daje 15 – 25% više izlazne snage za iste uvjete geotermalnog fluida. Nisu brojne kao one s jednostrukim isparavanjem, u svijetu ih je 2010.godine bilo 64 s ukupno instaliranim kapacitetom od oko 2180 MW.

Mnogi aspekti postrojenja s dvostrukim isparavanjem su slični onima kod jednostrukog isparavanja pa će ovdje biti navedene samo neke razlike između ta dva sustava. Nova karakteristika je kao što samo ime kaže proces drugog isparavanja, koji se provodi sa separiranom kapljevnom iz prvog separatora kako bi se generirala dodatna količina pare, premda na nižem tlaku nego primarna para.

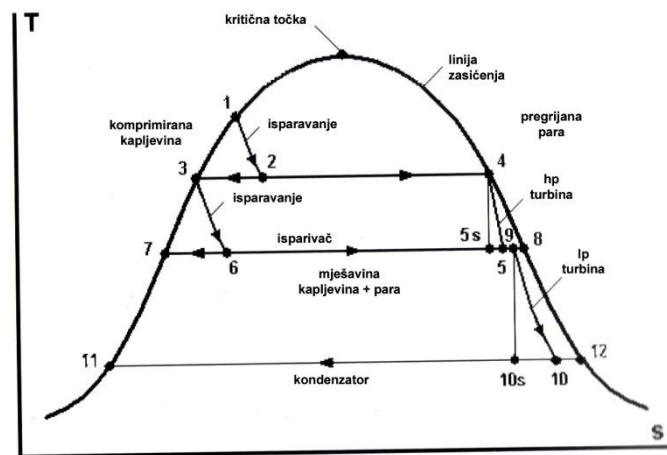
3.3.1 Sustav energetske pretvorbe

Shema postrojenja prikazana je na slici 15. Konstrukcija se razlikuje od postrojenja s jednostrukim isparavanjem (sl. 14) po tome što je pridodan isparivač F kao i parovod niskotlačne pare od isparivača do turbine uz već postojeći visokotlačni koji dovodi paru iz separatora.



Slika 15. Toplinska shema ciklusa geotermalne elektrane s dvostrukim isparavanjem[1]

Kao što je već viđeno u gore opisanim slučajevima kod elektrane na suhu paru i elektrane s jednostrukim isparavanjem proces koji radni fluid napravi najbolje je vidljiv iz termodinamičkog T-s dijagrama koji je za postrojenje s dvostrukim isparavanjem prikazano na slici 16.



Slika 16. T – s dijagram postrojenja s dvostrukim isparavanjem[1]

Ovdje je važno naglasiti pravilo kod odabira temperature T3 u separatoru. Približna jednačba glasi :

$$T_{3,opt} = \frac{T_1 + T_6}{2}$$

Pravilo ukazuje da je temperaturno područje između ležišta i kondenzatora podijeljeno na dva jednaka segmenta, to se ponekad naziva pravilo «dijeljenja na jednake temperature». To se aproksimacijsko pravilo primjenjuje na sva postrojenja s isparavanjem, ne gledajući na broj isparavanja. Za postrojenje s dva isparavanja pravilo glasi: temperaturna razlika između

ležišta i prvog isparavanja je jednaka temperaturnoj razlici između prvog isparavanja i drugog isparavanja, a također je jednaka temperaturnoj razlici između drugog isparavanja i kondenzatora.

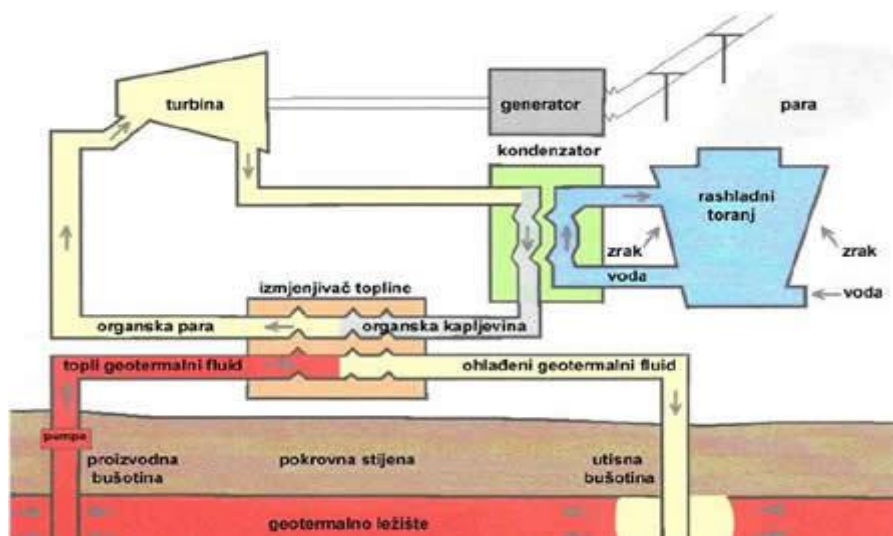
3.4 Geotermalne elektrane s binarnim ciklusom

U geotermalnim elektranama s binarnim ciklusom, toplina geotermalne vode (prvi fluid) predaje se preko izmjenjivača topline zatvorenom ciklusu radnog fluida (drugi fluid) u kojem se toplinska energija pretvara u mehanički rad. Radni fluid, odabran prema povoljnim termodinamičkim svojstvima, prima toplinu dakle od geotermalnog fluida, isparava, ekspandira u turbini, kondenzira, te se vraća u isparavač pomoću napojne pumpe. Mehanički rad turbine pretvara se pogonom generatora u električnu energiju.

Za razliku od ostalih tipova geotermalnih elektrana kod binarnih elektrana postoje dva fluida, geotermalna voda (primarni fluid) i radni medij (sekundarni fluid) koji se nalaze u potpuno odvojenim krugovima što znači da ne dolazi do njihovog miješanja. Topliji, geotermalni fluid predaje toplinsku energiju hladnijem radnom fluidu u izmjenjivaču topline. Najvažnija karakteristika radnog fluida je da ima mnogo nižu točku isparavanja od vode. Stoga je odabir radnog medija veoma važna komponenta pri dizajniranju ovakvog tipa elektrane.

Danas su binarna postrojenja najčešće korišteni tip geotermalnih elektrana u svijetu a ukupna instalirana električna snaga iznosi cca 274 MW. Prema broju jedinica čine 33% od svih geotermalnih elektrana u radu, ali proizvode samo 3% od ukupne snage. Prosječna snaga po jedinici je mala, samo 1,8 MW, mada u budućnosti dolaze u eksploataciju i jedinice sa snagama 7 - 10 MW s tzv. naprednim ciklusom.

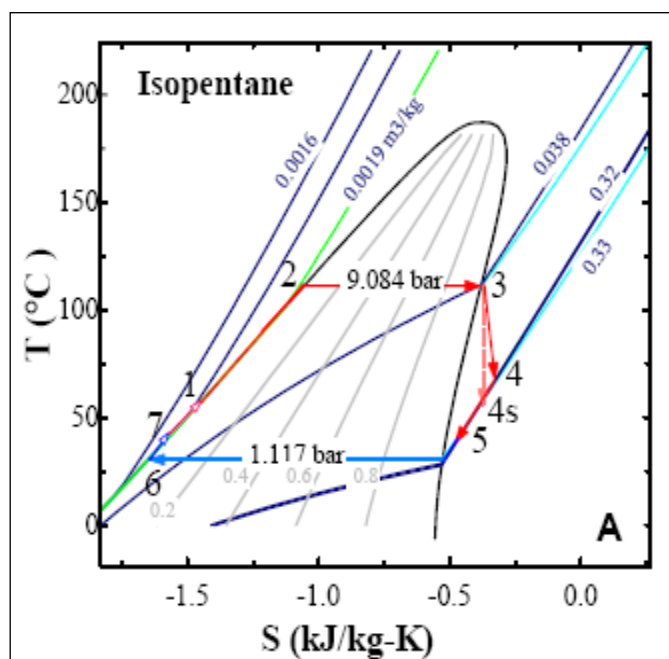
Većina binarnih elektrana (slika 17.) na svijetu kao radni medij koriste fluide organskog porijekla, poput *izobutana* i *izopentana*. No, između ostalog koriste se i radni mediji anorganskog porijekla (Kalina ciklus).



Slika 17. Shema binarne elektrane[2]

3.4.1 Geotermalne elektrane s organskim Rankine-ovim ciklusom (ORC)

Organski Rankine-ov ciklus se bazira na istim termodinamičkim principima i ima iste komponente (izmjjenjivač, turbina, kondenzator, kondenzatorska pumpa) kao konvencionalni parni ciklus, samo što se umjesto vode kao radnog medija koriste organski spojevi poput toluena, pentana i drugih. Ovi fluidi su karakterizirani kao suhi fluidi i imaju neka zanimljiva svojstva u usporedbi s vodom. Organski fluidi su u prednosti u odnosu na vodu jer mogu ispariti pri nižim temperaturama i tlakovima, nije potrebno pregrijavanje i toplina koja se oslobađa isparavanjem je oko 10 puta manja nego kod vode.



Slika 18. Osnovni termodinamički dijagram Rankineovog ciklusa sa izopentanom kao radnim fluidom

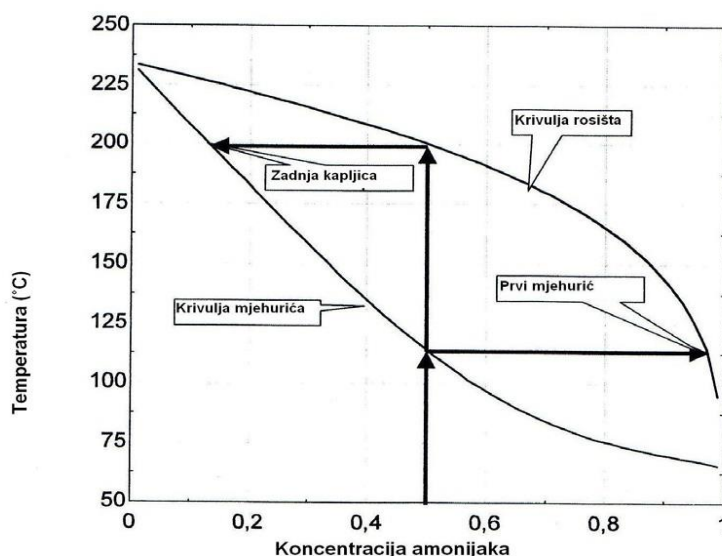
Na slici 18. prikazan je termodinamički dijagram ireverzibilnog Rankineovog ciklusa, tj. stvarni proces koji se odvija nad radnim medijem u sekundarnom krugu. On se razlikuje od idealnog Rankineovog ciklusa jer se uzimaju u obzir nepovratni gubici topline zbog trenja, promjene kinetičke i potencijalne energije, itd.

3.4.2 Geotermalne elektrane s Kalina ciklusom

Kalina tehnologija je dobila ime po izumitelju Alexanderu Kalina, ruskom znanstveniku. Metodologija je bazirana na proizvodnji električne energije upotrebljavajući toplinu geotermalnih resursa s ciljem isparavanja mješavine amonijaka i vode, koja cirkulira u zatvorenom krugu. Upravo mješavina amonijaka i vode čini ovu tehnologiju posebnom. Prednost ove mješavine je da se i isparavanje i kondenzacija mješavine događaju pri različitim temperaturama, tj. postoji raspon temperatura pri kojima se događa isparavanje i

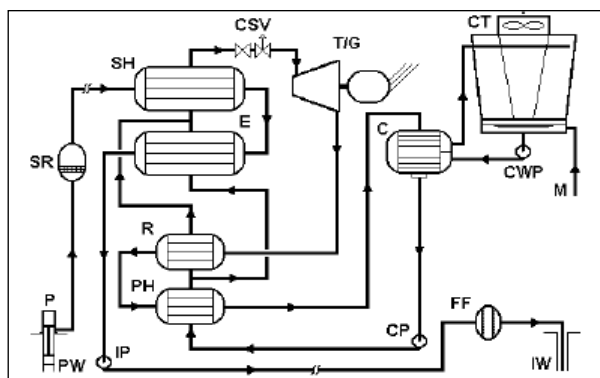
kondenzacija. Temperatura isparavanja je najveća pri 67 %-oj koncentraciji amonijaka i tada iznosi oko 95 °C.

Na slici 19. je prikazan fazni dijagram mješavine amonijak-voda pri tlaku od 30 bara i procesu isparavanja 50%-tne mješavine. Donja krivulja, tzv. krivulja mjehurića, predstavlja krivulju pojave prvog parnog mjehurića. Taj mjehurić ima višu koncentraciju amonijaka od tekućine koja isparava. Kako je sadržaj amonijaka u mjehuriću veći nego onaj u tekućoj fazi, sadržaj amonijaka u tekućoj fazi se smanjuje. Gornja krivulja je krivulja rosišta kada zadnja kapljica ispari. Ta kapljica ima osjetno nižu koncentraciju amonijaka nego para.



Slika 19. Fazni dijagram amonijak voda pri tlaku 30 bara

Temperature izvora (geotermalni fluid) i ponora (rashladna voda u kondenzatoru) topline ograničuju gornju i donju temperaturu radnog fluida. Promjenom sastava mješavine amonijaka i vode kao radnog medija možemo upravljati tlakom u sistemu. Pri zadanim uvjetima hlađenja tlak u kondenzatoru možemo sniziti smanjivanjem koncentracije amonijaka u radnom fluidu u fazi kondenzacije. Povećanje koncentracije amonijaka podiže se tlak isparavanja u drugom dijelu procesa. Na slici 20. prikazana je tipična shema postrojenja Kalina ciklusa.



Slika 20. Toplinska shema Kalina ciklusa[1]

4. Termodinamički proračuni mogućih tehnologija iskoristivih na geotermalnom polju Slatina

4.1 Karakteristike geotermalnog polja Slatina

4.1.1 Smještaj grada Slatine

Područje grada Slatina pripada sjeverozapadnom dijelu šire geografske cjeline Istočne Hrvatske, koja je najistočniji dio Republike Hrvatske. Slatina je smještena na g.š. 45°42'17" N i g.d. 17°42'28" E, na prosječnoj nadmorskoj visini od 127 m.



Slika 21. Smještaj grada Slatine[4]

Teritorijalno grad Slatina pripada prostoru Virovitičko – podravske županije, koja se nalazi na kontaktu središnje i istočne Hrvatske. U okviru prostora županije grad Slatina pripada njenom središnjem, odnosno jugoistočnom dijelu. Grad Slatina zauzima površinu od 166,75 km², što predstavlja 8,25% županije. Broj stanovnika prema popisu iz 2011.godine je 13 686, a gustoća naseljenosti 82 st/km². Grad Slatina svojim prirodnim vrijednostima, reljefom, geološkim sastavom tla, klimatskim i hidrološkim karakteristikama, vegetacijskim pokrovom i florom ima izuzetan značaj u Virovitičko – podravskoj županiji.

4.1.2 Reljefna i geološka obilježja

Najstarije stijene su pontske starosti, a predstavljene su razvojem žućkast-osivih, sivih i smeđih pjeskovitih lapora, kalcitčnih lapora, uglavnom bez izražene slojevitosti. Samo lokalno se zapaža povećani sadržaj kalcita u stijenama koje prelaze i u glinovite vapnence. Pripadnost ovih naslaga određena je temelju čestih pronalazaka fosila. Veliku rasprostranjenost imaju i pleistocenski sedimenti od kojih su najznačajnije jezersko-barske naslage. To su raznobojni lesoliki siltovi s obiljem primjesa feruginozne tvari, šarene ilovače i

gline. U pojedinim slojevima česte su koncentracije željezo-manganskih konkrecija ili kalcita. U tektonskom pogledu, najmarkantniji element u širem području je tzv. glavni uzdužni potolinski rasjed koji odvaja masiv Bilogore od tzv. «glavne potolinske zone». Prema poznatim podacima, radi se o vertikalnom ili subvertikalnom reversnom rasjedu duž kojeg je sjeveroistočno krilo tijekom tercijara i kvartara postepeno spuštalo. Ovo spuštanje u kvartaru iznosi oko 150 m. Slatina je smještena na oba krila ovog rasjeda koji je i danas seizmološki aktivan.

Reljef prostora grada Slatine, podijeljen je poprečno na dva osnovna tipa. Sjeverni dio je nizina, a južni dio čine obronci lanca Papuka. Nizinski dio je prostor pridravске ravnice i dio otvorenog panonskog prostora. Lanac Papuka nije kompaktan i jedinstven, već je razveden poprečnim udolinama duž vodotoka. Nizinski dio je područje vrlo male reljefne energije. To je tipičan akumulacijski prostor, nastao akumulacijsko-erozijskim radom rijeke Drave i njenih pritoka, te eolskim radom. Starija virmska terasa rijeke Drave ili tzv. viša pleistocena terasa razvijena je uz sam kontakt nizine prema Papuku te je to cjelovit prostor koji zbog pretežno lesnog pokrova, kao i ocjeditosti, predstavlja agrarno najvrjedniji dio.

4.1.3 Geotermalni resursi Slatinskog područja

Na širem području Grada Slatine nalazi se desetak bušotina čiji podaci ukazuju da se radi o energetske veoma obećavajućem geotermalnom polju, s temperaturama vode od 70 - 183°C. Preliminarna ispitivanja ranih šezdesetih i sedamdesetih godina nedvojbeno ukazuju na visoku energetske učinkovitost postojećih geotermalnih potencijala, koja se ipak, s obzirom na vremenski odmak, ponovo trebaju valorizirati i definirati u kontekstu trenutnih potreba i zahtjeva postojećih investitora.

Tvrtka INA d.d. Zagreb je u razdoblju od 1959. – 1989. vršila istražna bušenja s ciljem pronalaženja nafte i plina, međutim, kako isto nije pronađeno, bušotine su uglavnom likvidirane, kao ne-perspektivne, zabetonirane ili blindirane. U tablici 8. Prikazani su podatci o postojećim bušotinama na području grada Slatine. [4]

Tablica 8. Bušotine na širem području grada Slatine

Naziv bušotine	Dubina (m)	Izmjerena temperatura
Podravska Slatina 1 (PS-1)	2925,00	110°C
Podravska Slatina 1 (PS-5)	5051,0	183°C
Čeralije (čer 1)	1878,0	69°C
Podravska Slatina 2 (PS-2)	3306,0	138°C
Podravska Slatina 3 (PS-3)	2707,0	99°C
Podravska Slatina 4 (PS-4)	3510,0	Nema podataka
Čeralije 2 (čer-2)	813,9	Nema podataka
Gornje Viljevo (GV-1)	4092,5	172°C na 3943m
Gornje Viljevo 1alfa (GV-1a)	5080,0	191°C na 4500m
Bakić 1 (BAK-1)	4999,0	178°C na 4872m
Donja Bukovica 1 (DB-1)	4496,0	178°C
Bukovica 1 (BKC-1)	4102,0	170°C
Donja Bukovica 2 (DB-2)	3874,0	174°C

4.2 Predloženi tipovi geotermalne elektrane Slatina

Na geotermalnom polju Slatina moguće je upotrijebiti neke od tipova elektrane opisanih u poglavljima ranije, a najpogodnije za to su elektrana s jednostrukim isparavanjem, dvostrukim isparavanjem. Za svaki od ovog tipa je izrađen termodinamički proračun i predložena je najpovoljnija tehnologija odnosno tip elektrane.

Kod elektrana s jednostrukim i dvostrukim isparavanjem radni fluid je geotermalna voda koja pod tlakom penetrira kroz bušotinu, dok je kod binarnog postrojenja (ORC) radni fluid lako hlapljivi izopentan. U predloženom binarnom postrojenju geotermalni fluid predaje toplinu radnom fluidu s hlađenjem od 183°C na 69°C. Nakon toga se geotermalna voda može koristiti za direktnu upotrebu, za grijanje zgrada, staklenika, bazena, itd. Kod prva dva tipa geotermalni fluid se hladi s temperature 183°C na 26°C te nakon toga nije moguće više iskoristiti preostalu energiju geotermalnog fluida.

4.2.1 Proračun geotermalne elektrane s jednostrukim isparavanjem

Termodinamički model postrojenja je potreban kako bi se odredile sve termodinamičke veličine stanja u pojedinim karakterističnim točkama potrebne za konstrukciju i odabir pojedinih komponenata postrojenja, te da bi se izračunala termodinamička iskoristivost samoga ciklusa, a i postrojenja u cjelini. Niže prikazani termodinamički model je napravljen na temelju termodinamičkih osnova i znanja stečenih kroz školovanje na fakultetu.

Ulazni podatci:

- $\vartheta_{w,ul} = 183^{\circ}\text{C}$ - ulazna temperatura geotermalne vode
- $\vartheta_{w,iz} = 26^{\circ}\text{C}$ - izlazna temperatura geotermalne vode
- $p_w = 11 \text{ bar}$ - tlak geotermalne vode
- $\dot{m}_w = 88,43 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ - maseni protok geotermalnog fluida

Proces počinje s geotermalnim fluidom pri tlaku u točki 1, na samoj liniji zasićenja kapljevine. Za proces isparavanja se pretpostavlja da se odvija uz konstantnu entalpiju, tj. radi se o izoentalpijskom procesu, i istovremeno bez izmjene topline s okolišem (tj. adijabatski) i bez izmjene rada. Također se zanemaruju promjene kinetičke i potencijalne energije fluida tijekom procesa isparavanja. Stoga se može napisati:

$$h_1 = h_2$$

Jednadžba daje maseni udio pare u mješavini i to je količina pare koja se odvodi u turbinu po jedinici ukupnog masenog protoka u separator.

Rad koji obavlja turbina po jedinici masenog protoka pare (specifična snaga) dan je jednačom:

$$w_t = h_h - h_s,$$

uz pretpostavku da nema toplinskih gubitaka i ako se zanemare promjene kinetičke i potencijalne energije fluida na ulazu i izlazu iz turbine. Maksimalno mogući dobiveni rad bit će u slučaju ako je proces u turbini povrativ i adijabatski, tj. uz konstantnu entropiju odn. izentropski. Stoga se može definirati izentropska iskoristivost turbine, η_t , kao omjer stvarnog rada i izentropskog rada:

$$\eta_t = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{5s}}$$

Snaga koju razvija turbina dana je jednačom:

$$\dot{W}_t = \dot{m}_s w_t = x_2 \dot{m}_{total} w_t$$

Efektivna snaga turbine bit će jednaka unutarnjoj snazi turbine pomnoženoj s mehaničkom iskoristivošću:

$$W_{ef} = \eta_{meh} W_t = \eta_{meh} x_2 \dot{m}_{total} w_t$$

Ukupna električna snaga bit će jednaka umnošku ukupne snage turbine i iskoristivosti električnog generatora:

$$\dot{W}_e = \eta_g \dot{W}_t$$

Termodinamička iskoristivost postrojenja koje izvodi zatvoreni ciklus η_{th} je:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_e}{Q_{in}}$$

Rješenje:

Količina suhozasićene pare, x , u mješavini koja nastaje nakon isparavanja, stanje 2, može se odrediti iz jednačbe:

$$x_2 = \frac{h_2 - h_3}{h_4 - h_3}$$

Očitane vrijednosti iz toplinskih tablica:

- $h_1 = 776,468 \text{ kJ/kg} = h_2$
- $p_3 = 1,20902 \text{ bar}$
- $h_3 = 440,21 \text{ kJ/kg}$
- $h_4 = 2683,39 \text{ kJ/kg}$

- $s_3 = 1,3632 \text{ kJ/kgK}$
- $s_4 = 7,2951 \text{ kJ/kgK}$

$$x_2 = \frac{h_2 - h_3}{h_4 - h_3} = 0,1499$$

- $s_4 = s_{5s}$
- $h_6 = 109,0194 \text{ kJ/kg}$
- $h_7 = 2548,448 \text{ kJ/kg}$
- $s_6 = 0,3812 \text{ kJ/kgK}$
- $s_7 = 8,53586 \text{ kJ/kgK}$

Stanje na izlazu iz turbine u slučaju idealne ekspanzije u točki 5s određuje se iz činjenice da je $s_{5s} = s_4$. Sadržaj suhozasićene pare u točki 5s:

$$x_{5s} = \frac{s_{5s} - s_6}{s_7 - s_6} = 0,8478$$

Stanje 5 se određuje rješavanjem uz korištenje iskoristivosti turbine i svojstava fluida kod stanja 5s, koje predstavlja stanje na izlazu iz turbine u slučaju idealnog procesa ekspanzije, a koje se lako može odrediti iz poznatog tlaka i entropije kod stanja 5s. Entalpija na izlazu iz turbine u slučaju idealne ekspanzije se određuje pomoću jednadžbe:

$$h_{5s} = h_6 + (h_7 - h_6) \frac{s_{5s} - s_6}{s_7 - s_6} = 2177,082 \text{ kJ/kg}$$

Kada se u proračun uključi Baumannovo pravilo, dobiva se sljedeća jednadžba za proračun entalpije na izlazu iz turbine u slučaju stvarne ekspanzije:

$$h_5 = \frac{h_4 - A \left(1 - \frac{h_6}{h_7 - h_6} \right)}{1 + \frac{A}{h_7 - h_6}} = 2276,967 \text{ kJ/kg}$$

gdje je faktor A definiran kao:

$$A = 0,425(h_4 - h_{5s}) = 215,1809$$

Uz sve dobivene podatke možemo izračunati izentropsku iskoristivost turbine:

$$\eta_t = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{5s}} = 80,27\%$$

Unutarnja snaga koju razvije turbina:

$$\dot{W}_t = \dot{m}_s w_t = x_2 \dot{m}_{total} (h_4 - h_5) = 5,3822 MW$$

Efektivna snaga turbine na izlaznom vratilu:

$$W_{ef} = \eta_{meh} W_t = \eta_{meh} x_2 \dot{m}_{total} w_t = 5,2207 MW$$

- $\eta_{meh} = 0,97$

Električna snaga na stezaljkama generatora:

$$W_{el} = \eta_g W_t = 5,27455 MW$$

- $\eta_g = 0,98$

Termodinamička iskoristivost ciklusa:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_t}{\dot{m}_{total} h_1} = 7,84\%$$

4.2.2 Proračun geotermalne elektrane s dvostrukim isparavanjem

U skladu sa sl. 16 dva procesa isparavanja, 1 – 2 i 3 – 6, se analiziraju na isti način kao proces isparavanja kod postrojenja s jednostrukim isparavanjem. Svaki proces generira pripadajuću količinu pare sa sadržajem suhozasićene pare x u dvofaznoj mješavini. Svaki od procesa isparavanja se nastavlja s procesom separacije.

Glavne jednadžbe su:

$$h_1 = h_2 ;$$

$$x_2 = \frac{h_2 - h_3}{h_4 - h_3} ;$$

$$h_3 = h_6 ;$$

$$x_6 = \frac{h_3 - h_7}{h_8 - h_7} .$$

Ulazni podatci:

- $\vartheta_{w,ul} = 183^\circ\text{C}$ - ulazna temperatura geotermalne vode
- $\vartheta_{w,iz} = 11^\circ\text{C}$ - izlazna temperatura geotermalne vode

- $p_w = 11 \text{ bar}$ - tlak geotermalne vode
- $\dot{m}_w = 88,43 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$ - maseni protok geotermalnog fluida

Očitane vrijednosti:

- $h_1 = 776,468 \text{ kJ/kg} = h_2$
- $T_3 = 131^\circ\text{C}$
- $p_3 = 2,7885 \text{ bar}$
- $h_3 = 550,666 \text{ kJ/kg} = h_6$
- $h_4 = 2721,446 \text{ kJ/kg}$
- $s_4 = 7,01656 \text{ kJ/kgK} = s_{5s}$
- $T_7 = 79^\circ\text{C}$
- $p_7 = 0,45651 \text{ bar}$
- $h_7 = 330,754 \text{ kJ/kg}$
- $h_8 = 2641,328 \text{ kJ/kg}$
- $s_7 = 1,06344 \text{ kJ/kgK}$
- $s_8 = 7,62504 \text{ kJ/kgK}$
- $p_{11} = 0,033854 \text{ bar}$

Visokotlačni stupanj:

$$x_2 = \frac{h_2 - h_3}{h_4 - h_3} = \frac{776,468 - 550,666}{2721,446 - 550,666} = 0,104;$$

$$x_6 = \frac{h_3 - h_7}{h_8 - h_7} = \frac{550,666 - 330,754}{2641,328 - 330,754} = 0,0952;$$

$$x_{5s} = \frac{s_{5s} - s_6}{s_8 - s_7} = \frac{7,01656 - 1,06344}{7,62504 - 1,06344} = 0,90726$$

Stvarno izlazno stanje iz visokotlačnih stupnjeva turbine može se odrediti koristeći Baumannovo pravilo kao kod procesa s jednostrukim isparavanjem:

$$h_5 = \frac{h_4 - A \left[1 - \frac{h_7}{h_8 - h_7} \right]}{1 + \frac{A}{h_8 - h_7}},$$

gdje je faktor A definiran kao:

$$A = 0,425(h_4 - h_{5s}).$$

$$h_{5s} = h_7 + (h_8 - h_7) \frac{s_{5s} - s_6}{s_7 - s_6} = 330,754 + 0,90726(2641,328 - 330,754) = 2427,045 \text{ kJ/kg}$$

$$A = 0,425(h_4 - h_{5s}) = 0,425(2721,446 - 2427,045) = 125,12;$$

$$h_5 = \frac{h_4 - A \left[1 - \frac{h_7}{h_8 - h_7} \right]}{1 + \frac{A}{h_8 - h_7}} = 2479,938 \text{ kJ/kg}.$$

Visokotlačni stupnjevi turbine mogu se analizirati u skladu s metodologijom korištenom kod turbine s jednostrukim isparavanjem:

$$w_{hpt} = h_4 - h_5 = 2721,446 - 2479,938 = 241,507 \text{ kJ/kg};$$

$$\dot{W}_{hpt} = x_2 \dot{m}_{total} w_{hpt} = 0,104 * 88,43 * 241,507 = 2219,796 \text{ kW};$$

$$\eta_{hpt} = \frac{h_4 - h_5}{h_4 - h_{5s}} = \frac{2721,446 - 2479,938}{2721,446 - 2427,045} = 82,03\%.$$

U skladu sa sl. 16 djelomično odekspandirana para je stanja 5, niskotlačna para je stanja 8 (zasićena para), a para nastala miješanjem, koja nastavlja ekspanziju u niskotlačnim stupnjevima turbine, je stanja 9. Prvi zakon termodinamike i zakon o očuvanju mase omogućava određivanje stanja pare nakon miješanja:

$$h_9 = \frac{x_2 h_5 + (1 - x_2) h_8}{x_2 + (1 - x_2)} = 2552,645 \text{ kJ/kg}$$

Očitane vrijednosti:

- $h_{11} = 109,0194 \text{ kJ/kg}$
- $h_{12} = 2548,348 \text{ kJ/kg}$
- $s_{11} = 0,3812 \text{ kJ/kgK}$
- $s_{12} = 8,53586 \text{ kJ/kgK}$

Stanje pare nakon izlaza iz turbine možemo odrediti:

$$x_9 = \frac{h_9 - h_7}{h_8 - h_7} = \frac{2552,645 - 330,754}{2641,328 - 330,754} = 0,9616$$

Entropiju u točki 9 određujemo pomoću:

$$s_9 = x_9(s_8 - s_7) + s_7 = 7,373 \text{ kJ/kgK}$$

$$s_9 = s_{10s}$$

Dalje niskotlačni dio turbine analiziramo kao:

$$h_{10s} = h_{11} + [h_{12} - h_{11}] \left[\frac{s_9 - s_{11}}{s_{12} - s_{11}} \right] = 2200,498 \text{ kJ/kg};$$

Pomoću Baumannovog pravila određuje entalpiju u točki 10:

$$A = 0,425(h_9 - h_{10s}) = 0,425(2552,645 - 2200,498) = 149,662;$$

$$h_{10} = \frac{h_9 - A \left[x_9 - \frac{h_{11}}{h_{12} - h_{11}} \right]}{1 + \frac{A}{h_{12} - h_{11}}} = 2275,7916 \text{ kJ/kg}$$

Maseni protok pare i kapljevine (geotermalne vode) za visokotlačni i niskotlačni stupanj se određuju pomoću jednadžbi:

$$\dot{m}_{hps} = x_2 \dot{m}_{total} = \dot{m}_4 = \dot{m}_5 = 0,104 * 88,43 = 9,1914 \text{ kg/s};$$

$$\dot{m}_{lps} = (1 - x_2) \dot{m}_{total} = \dot{m}_8 = (1 - 0,104) * 0,0952 * 88,43 = 7,5386 \text{ kg/s}.$$

Ti se maseni protoci koriste za proračun snage koju proizvodi dvostrujna turbina, količine otpadne kapljevine (kapljevite faze) koja se mora odvesti, te topline koja se mora odvesti preko kondenzatora i preko rashladnog tornja.

Nadalje računamo snagu koju proizvodi niskotlačna turbina:

$$\dot{W}_{lpt} = (\dot{m}_5 + \dot{m}_8)(h_9 - h_{10}) = 4631,757 \text{ kW}$$

Stupanj iskoristivosti niskotlačnog dijela:

$$\eta_{lpt} = \frac{h_9 - h_{10}}{h_9 - h_{10s}} = \frac{2552,645 - 2275,7916}{2552,645 - 2200,498} = 78,62\%$$

Tada je ukupna proizvedena snaga jednaka zbroju snaga visokotlačnog i niskotlačnog dijela turbine:

$$\dot{W}_{total} = \dot{W}_{hpt} + \dot{W}_{lpt} = 2219,796 + 4631,757 = 6851,553 \text{ kW}$$

Na kraju se ukupna električna snaga može odrediti iz jednadžbe:

$$\dot{W}_{el} = \eta_g \dot{W}_{total} = 0,98 * 6851,553 = 6714,523 kW$$

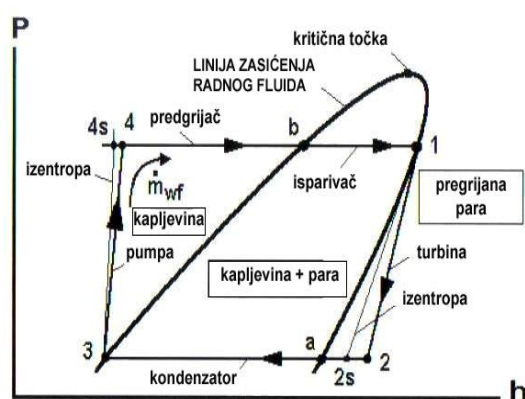
- $\eta_g = 0,98$

Termodinamička iskoristivost ciklusa:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_t}{m_{total} h_1} = 9,985\%$$

4.2.3 Proračun binarne elektrane s ORC ciklusom

Termodinamički ciklus koji izvodi radni fluid je prikazan na slici 22. u tlak – entalpija dijagramu, tj. p-h dijagramu. Taj se dijagram najčešće koristi kod rashladnih i ciklusa klimatizacije, ali također i za geotermalne binarne cikluse. Iz slike 22. se može vidjeti specifičnost linije zasićenja lakohlapljivih fluida ORC-a u našem slučaju to je pentan, koji ima tkz. retrogradnu liniju suhozasićene pare. To je dobro zbog toga što se ekspanzija u turbini obavlja u području pregrijane pare.



Slika 22. p-h dijagram geotermalne elektrane s binarnim ciklusom i lako hlapljivim pentanom [1]

Matematički model postrojenja izrađen je u tabličnom kalkulatoru Microsoft Excel, u koji su integrirane funkcije programa REFPROP, što omogućava izračunavanje veličina stanja pojedinih fluida.

Ulazni podatci:

- $q_{vw} = 100 \text{ lit./s}$ – protočni volumen geofluida.
- $t_{1w} = 183 \text{ °C}$ – ulazna temperatura geofluida.
- $t_{zrak} = 11 \text{ °C}$ – srednja godišnja temperatura zraka za Slatinu
- $p_w = 11 \text{ bar}$ – ulazni tlak geofluida

- $h_{1w} = 776,4449 \text{ kJ/kg}$ – ulazna entalpija geofluida
- $\rho_{1w} = 883,79 \text{ kg/m}^3$ – gustoća geofluida
- $q_{mw} = q_{vw} \rho_{1w} = 88,43 \text{ kg/s}$ – maseni protok geofluida
- $\bar{c}_{gf} = 4224 \text{ J/kgK}$ – specifična toplina geotermalne vode

Izlazna temperatura geotermalne vode je ograničena na minimalno 69°C , da bi se omogućila daljnja upotreba za spa, staklenike, sušenje voća i povrća.

- $t_{2w} = 69^\circ\text{C}$ – izlazna temperatura geofluida
- $h_{2w} = 289,7516 \text{ kJ/kg}$ – izlazna entalpija geofluida

Maseni protok radnog fluida određujemo pomoću jednadžbe:

$$\dot{m}_{wf} = \frac{\dot{m}_{gf} \bar{c}_{gf} (T_{1w} - T_{2w})}{h_1 - h_4}$$

Entalpiju na ulazu u turbinu h_1 , kao i entropiju s_1 određujemo interpolacijom ili očitavamo podatke koje smo dobili u tabličnom prikazu pomoću programa REFPROP:

- $h_1 = 485,7006 \text{ kJ/kg}$
- $s_1 = 1,3044 \text{ kJ/kgK}$

Entalpija na izlazu iz napojne pumpe u slučaju stvarne adijabatske ekspanzije određujemo iz jednadžbe:

$$h_4 = \frac{v_{wf}(p_4 - p_3)}{\eta_p} + h_3$$

Tlakovi p_4 i p_3 su dobiveni optimiranjem, a prema tome tlak p_4 predstavlja gornji tlak procesa, a tlak p_3 je donji tlak procesa.

- $p_4 = p_1 = 8,5 \text{ bar}$
- $p_3 = p_2 = 0,71 \text{ bar}$

Entalpiju vrele kapljevine h_3 na ulazu u napojnu pumpu očitavamo za zasićeni izopentan za tlak:

$$h_3 = -23,6091$$

Specifični volumen kapljevine izopentana:

$$v_{wf} = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{619,7956} = 0,0016134 \text{ m}^3 / \text{kg}$$

- $\rho_3 = 619,7956 \text{ kg/m}^3$ – gustoća vrele kapljevine

Iz toga slijedi:

$$h_4 = \frac{v_{wf}(p_4 - p_3)}{\eta_p} + h_3 = \frac{0,0016134(8,5 - 0,71)}{0,8} + (-23,6091) = -22,0388 \text{ kJ/kg}$$

Maseni protok radnog fluida \dot{m}_{wf} :

$$\dot{m}_{wf} = \frac{\dot{m}_{gf} \bar{c}_{gf} (T_{1w} - T_{2w})}{h_1 - h_4} = 84,696 \text{ kg/s}$$

Što predstavlja količinu isparenog izopentana u sekundi.

Toplina koju geofluid ukupno preda možemo izračunati:

$$\dot{Q}_{gf} = (h_{1w} - h_{2w}) \dot{m}_{mw} = (776,3349 - 289,7516) * 88,43 = 43003,75 \text{ kW}$$

Unutarnja snaga turbine:

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{wf} (h_1 - h_2) = \dot{m}_{wf} \eta_t (h_1 - h_{2s})$$

Gdje se entalpija pregrijane pare izopentana u slučaju izentropske ekspanzije u turbini određuje na temelju interpolacije za pregrijanu paru izopentana pri tlaku p_2 na temelju vrijednosti $s_{2s}=s_1$ (u našem slučaju očitano iz tablica koje su nam dostupne pomoću programa REFPROP).

- $s_{2s} = s_1 = 1,3044 \text{ kJ/kgK}$
- $h_{2s} = 392,043 \text{ kJ/kg}$
- $\eta_t = 0,85$ – stupanj iskoristivosti turbine

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{wf} \eta_t (h_1 - h_{2s}) = 84,696 * 0,85 (485,7006 - 392,043) = 6,742 \text{ MW}$$

Unutarnja snaga napojne pumpe:

$$\dot{W}_p = \dot{m}_{wf} (h_4 - h_3) = 84,696 (-22,0388 + 23,6091) = 132,998 \text{ kW}$$

Efektivna snaga turbine:

$$\dot{W}_{ef} = \eta_{meh} \dot{W}_t = 0,97 * 6,742 = 6,5397 \text{ MW}$$

- $\eta_{meh} = 0,97$ - mehanička iskoristivost turbine

Električna snaga na stezaljkama generatora:

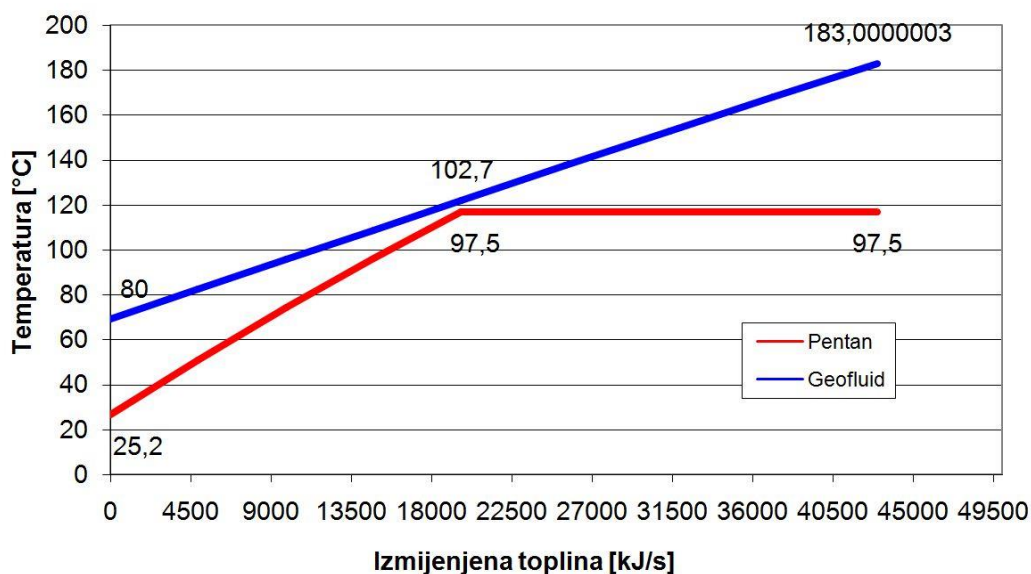
$$\dot{W}_{el} = \eta_g \dot{W}_{ef} = 0,98 * 6,5397 = 6,4089 \text{ MW}$$

- $\eta_g = 0,98$ – iskoristivost električnog generatora

Termodinamička iskoristivost ciklusa:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_t - W_p}{Q_{gf}} = \frac{6,742 - 0,132998}{43,003} = 15,36\%$$

Važno je također napomenuti da se izračunavanjem najmanje razlike temperatura u predgrijaču-isparivaču, provjerava da li je modelirani proces izvediv u praksi. Točka u kojoj se pojavljuje najmanja razlika temperatura između struja naziva se pinch točka izmjenjivača. Kod predgrijača-isparivača je to točka u kojoj počinje isparavanje pentana pri konstantnoj temperaturi što je u slučaju našega modela prikazano na slici 23.



Slika 23. Ovisnost temperature struja o izmijenjenoj toplini u predgrijaču-isparivaču

Na temelju izračunatih vrijednosti i usporedbe dobivenih rezultata za tipove elektrana koji su izvedivi na geotermalnom polju Slatina, najveća iskoristivost se dobiva kod geotermalne elektrane s binarnim ciklusom, dok je razlika u snagama ORC-a i elektrane s dvostrukim isparavanjem vrlo mala. Najvažnije vrijednosti možemo vidjeti iz tablice 9. A predloženi tip elektrane na geotermalnom polju Slatina bi bila binarna elektrana s ORC ciklusom.

Tablica 9. Usporedba predloženih tehnologija

Tip elektrane	Izlazna snaga (MW)	Iskoristivost
Geotermalna elektrana s jednostrukim isparavanjem	5,382	7,84%
Geotermalna elektrana s dvostrukim isparavanjem	6,851	9,985%
Binarna elektrana – ORC	6,742	15,36%

5. Proračun turbine

5.1. Proračun prvog stupnja turbine

1. Brzina vrtnje rotora

$$n = 1500 \text{ min}^{-1}$$

2. Promjer u korijenu statorskih lopatica

$$d_{1k} = 750 \text{ mm} ; d_{kl} = \text{konst.}$$

3. Srednji promjer statorskih lopatica

$$d_{1s} = d_{kl} + l_1 = 750 + 51,9$$

$$d_{1s} = 801,9 \text{ mm}$$

$$l_1 = 51,9 \text{ mm} - \text{pretpostavljena visina statorskih lopatica}$$

4. Obodna brzina za srednji promjer statorskih lopatica

$$u_1 = \frac{d_{1s} \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{0,8019 \cdot \pi \cdot 1500}{60}$$

$$u_1 = 62,95 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

5. Reaktivnost na srednjem promjeru

$$R_{sr} = \frac{1,8}{1,8 + \left(\frac{d_{1s}}{l_1} \right)} = \frac{1,8}{1,8 + \left(\frac{801,9}{51,9} \right)}$$

$$R_{sr} = 0,1043 = 10,43 \%$$

6. Optimalni odnos obodne i fiktivne brzine stupnja

$$\left(\frac{u}{c_F} \right)_{\text{opt.}} = \frac{\varphi \cdot \cos \alpha_{1E}}{2 \cdot \sqrt{1 - R_{sr}}} = \frac{0,97 \cdot \cos 15}{2 \cdot \sqrt{1 - 0,1043}}$$

$$\left(\frac{u}{c_F} \right)_{\text{opt.}} = 0,49501$$

$\varphi = 0,97$ - koeficijent brzine statorskih lopatica

$\alpha_{1E} = 15^\circ$ - efektivni izlazni kut profila statorskih lopatica

7. Fiktivna brzina stupnja

$$c_F = \frac{u_1}{\left(\frac{u}{c_F}\right)_{\text{opt.}}} = \frac{62,95}{0,49501}$$

$$c_F = 127,17 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

8. Izentropski toplinski pad stupnja

$$\Delta h_{\text{is}} = \frac{c_F^2}{2 \cdot 10^3} = \frac{127,17^2}{2 \cdot 10^3}$$

$$\Delta h_{\text{is}} = 10,2956 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

9. Izentropski toplinski pad u statorskoj rešetci

$$\Delta h_{\text{S, is}} = (1 - R_{\text{sr}}) \cdot \Delta h_{\text{is}} = (1 - 0,1043) \cdot 10,2956$$

$$\Delta h_{\text{S, is}} = 9,2213 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

10. Teoretska apsolutna brzina toka pare na izlazu iz statorske rešetke

$$c_{1t} = \sqrt{2 \cdot \Delta h_{\text{S, is}}} = \sqrt{2 \cdot 9,2213}$$

$$c_{1t} = 135,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

11. Entalpija, tlak i specifični volumen pare na ulazu u stupanj (REFPROP Version 8.0)

$$h_0 = 485,7006 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$p_0 = 8,5 \text{ bar}$$

$$v_0 = 0,042514 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

12. Tlak i teoretski specifični volumen pare na izlazu iz statorske rešetke (REFPROP Version 8.0)

$$p_1 = 6,618 \text{ bar}$$

$$v_{1t} = 0,0561 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

13. Tlak i teoretski specifični volumen na izlazu iz rotorske rešetke, odnosno stupnja (REFPROP Version 8.0)

$$p_2 = 6,43 \text{ bar}$$

$$v_{2t} = 0,0579 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

14. Brzina zvuka na izlazu iz statorske rešetke

$$a_1 = \sqrt{\kappa \cdot p_1 \cdot v_{1t}} = \sqrt{1,1259 \cdot 6,618 \cdot 10^5 \cdot 0,0561}$$

$$a_1 = 204,453 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$\kappa = 1,1259$ - izentropski koeficijent za stanje izopentana na izlazu iz statorske rešetke

(REFPROP Version 8.0)

15. Machov broj na izlazu iz statorske rešetke

$$M_{1t} = \frac{c_{1t}}{a_1} = \frac{135,8}{204,453}$$

$$M_{1t} = 0,664$$

16. Odnos tlaka p_1 na izlazu iz statorske rešetke i tlaka p_0 na ulazu u statorsku rešetku

$$\varepsilon_1 = \frac{p_1}{p_0} = \frac{6,618}{8,5}$$

$$\varepsilon_1 = 0,778$$

17. Kritični odnos tlakova

$$\varepsilon_1^* = \varepsilon_{\text{krit.}} = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} = \left(\frac{2}{x + 1} \right)^{\frac{0,908}{0,908 - 1}}; \quad \kappa = 1,1259$$

$$\varepsilon_1^* = 0,5793$$

18. Potrebna površina izlaznog presjeka statorske rešetke za $M_{1t} < 1$, odnosno

$$\varepsilon_1 > \varepsilon_1^*$$

$$F_1 = \frac{D \cdot v_{1t}}{\mu_1 \cdot c_{1t}} = \frac{84,7068 \cdot 0,0561}{0,97 \cdot 135,8035}$$

$$F_1 = 0,03607 \text{ m}^2 = 360,7 \text{ cm}^2$$

$$D = 84,7068 \frac{\text{kg}}{\text{s}} - \text{količina pare izopentana koja struji kroz stupanj}$$

$$\mu_1 = 0,97 - \text{koeficijent protoka za statorsku rešetku}$$

19. Visina lopatica statorske rešetke

$$l_1 = \frac{F_1}{d_{1s} \cdot \pi \cdot \sin \alpha_{1E}} \frac{0,036074}{0,8019 \cdot \pi \cdot \sin 15^\circ}$$

$$l_1 = 0,0554 \text{ m} = 55,4 \text{ mm}$$

20. Odabir profila lopatica statorske rešetke (α_{1E}, M_{1t})

$$S - 90 - 15A$$

21. Kut ugradnje lopatica statorske rešetke

$$\alpha_u = 38^\circ$$

22. Relativni optimalni korak lopatica statorske rešetke

$$\bar{t}_{\text{opt},l} = 0,755$$

23. Duljina tetive profila statorske rešetke

$$b_l = 51,46 \text{ mm}$$

24. Stvarni optimalni korak lopatica statorske rešetke

$$t_{l,\text{opt.}} = b_l \cdot \bar{t}_{\text{opt},l} = 51,46 \cdot 0,755$$

$$t_{l,\text{opt.}} = 38,852 \text{ mm}$$

25. Broj lopatica statorske rešetke

$$z_l = \frac{d_{ls} \cdot \pi}{t_{l,\text{opt.}}} = \frac{801,9 \cdot \pi}{38,852}$$

$$z_l = 64,809 \Rightarrow 65$$

26. Korigirani stvarni korak statorske rešetke

$$t_{l\text{kor.}} = \frac{\pi \cdot d_{ls}}{z_l} = \frac{\pi \cdot 801,9}{65}$$

$$t_{l\text{kor.}} = 38,74 \text{ mm}$$

27. Korigirani relativni korak statorske rešetke

$$\bar{t}_{l\text{kor.}} = \frac{t_{l\text{kor.}}}{b_l} = \frac{38,74}{51,46}$$

$$\bar{t}_{l\text{kor.}} = 0,753$$

28. Koeficijent gubitka statorske rešetke

$$\zeta_s = 1 - \varphi^2 = 1 - 0,97^2$$

$$\zeta_s = 0,0591$$

$\varphi = 0,97$ – koeficijent brzine za statorsku rešetku

29. Stvarna apsolutna brzina toka pare na izlazu iz statorske rešetke

$$c_1 = \varphi \cdot c_{1t} = 0,97 \cdot 135,8$$

$$c_1 = 131,73 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

30. Kut toka pare na izlazu iz statorske rešetke ($M_{1t} < 1$)

$$\sin \alpha_1 = \sin \alpha_{1E} \cdot \frac{\mu_1}{\varphi} = \sin 15^\circ \cdot \frac{0,97}{0,97}$$

$$\alpha_1 = 15^\circ$$

31. Stvarna relativna brzina toka pare na ulazu u rotorsku rešetku

$$w_1 = \sqrt{c_1^2 + u_1^2 - 2 \cdot u_1 \cdot c_1 \cdot \cos \alpha_1}$$

$$w_1 = \sqrt{131,73^2 + 62,95^2 - 2 \cdot 62,95 \cdot 131,73 \cdot \cos 15^\circ}$$

$$w_1 = 72,77 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

32. Kut stvarne relativne brzine toka pare na ulazu u rotorsku rešetku

$$\beta_1 = \arcsin \left(\frac{c_1}{w_1} \cdot \sin \alpha_1 \right) = \arcsin \left(\frac{131,73}{72,77} \cdot \sin 15^\circ \right)$$

$$\beta_1 = 27,56^\circ$$

33. Gubitak u statorskoj rešetci

$$\Delta h_{g,s} = \Delta h_{s,is} \cdot \zeta_s = 9,2213 \cdot 0,0591$$

$$\Delta h_{g,s} = 0,545 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

34. Izentropski toplinski pad rešetke rotora

$$\Delta h_{R,is} = \Delta h_{is} \cdot R_{sr} = 10,2956 \cdot 0,1043$$

$$\Delta h_{R,is} = 1,074 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

35. Teoretska relativna brzina toka pare na izlazu iz rotorske rešetke

$$w_{2t} = \sqrt{2 \cdot \Delta h_{R,is} + w_1^2} = \sqrt{2 \cdot 1074 + 72,77^2}$$

$$w_{2t} = 86,27 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

36. Brzina zvuka za stanje na izlazu iz rotorske rešetke

$$a_2 = \sqrt{\kappa \cdot p_2 \cdot v_{2t}} = \sqrt{1,1236 \cdot 6,43 \cdot 10^5 \cdot 0,0579}$$

$$a_2 = 204,53 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$\kappa = 1,1236$ - izentropski koeficijent za stanje na izlazu iz rotorske rešetke

(REFPROP Version 8.0)

37. Machov broj na izlazu iz rotorske rešetke

$$M_{2t} = \frac{w_{2t}}{a_2} = \frac{86,27}{204,5}$$

$$M_{2t} = 0,421$$

38. Odnos tlaka na izlazu iz rotorske rešetke i na ulazu u rotorsku rešetku

$$\varepsilon_2 = \frac{p_2}{p_1} = \frac{6,43}{7,618}$$

$$\varepsilon_2 = 0,9716$$

39. Kritični odnos tlakova

$$\varepsilon_2^* = \varepsilon_{\text{krit.}} = \left(\frac{2}{\kappa + 1} \right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} = \left(\frac{2}{1,1236 + 1} \right)^{\frac{1,1236}{1,1236 - 1}} ; \quad \kappa = 1,1236$$

$$\varepsilon_2^* = 0,5798$$

$$\varepsilon_2^* < \varepsilon_2$$

40. Potrebna površina izlaznog presjeka rotorske rešetke ($\varepsilon_2 > \varepsilon_2^*$)

$$F_2 = \frac{D \cdot v_{2t}}{\mu_2 \cdot w_{2t}} = \frac{84,71 \cdot 0,0579}{0,93 \cdot 86,27}$$

$$F_2 = 0,061129 \text{ m}^2 = 611,29 \text{ cm}^2$$

$\mu_2 = 0,93$ - koeficijent protoka za rotorsku rešetku

41. Potrebno prekrivanje između lopatica rotorske i statorske rešetke

$\Delta l = 1,1 \text{ mm}$ - odabrano

42. Visina lopatice rotorske rešetke

$$l_2 = l_1 + \Delta l = 55,36 + 1,1$$

$$l_2 = 56,46 \text{ mm}$$

43. Promjer u korijenu rotorskih lopatica

$$d_{2k} = d_{1k} - 2 \cdot \Delta l_k = 750 - 2 \cdot 1$$

$$d_{2k} = 748 \text{ mm}$$

$\Delta l_k = 1 \text{ mm}$ - prekrivanje u korijenu između lopatica statorske i rotorske rešetke

44. Srednji promjer rotorske rešetke

$$d_{2s} = d_{2k} + l_2 = 748 + 56,46$$

$$d_{2s} = 804,46 \text{ mm}$$

45. Obodna brzina na srednjem promjeru rotorske rešetke

$$u_2 = \frac{d_{2s} \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{0,804 \cdot \pi \cdot 1500}{60}$$

$$u_2 = 62,91 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

46. Potrebni izlazni kut profila lopatice rotorske rešetke

$$\beta_{2E} = \arcsin \frac{F_2}{\pi \cdot d_{2s} \cdot l_2} = \arcsin \frac{0,061119}{\pi \cdot 0,804 \cdot 56,46}$$

$$\beta_{2E} = 27,28^\circ$$

47. Odabiranje profila lopatica rotorske rešetke

R – 4629A

48. Kut ugradnje lopatica rotorske rešetke (β_{2E}, M_{2t})

$$\beta_u = 75^\circ$$

49. Optimalni relativni korak lopatica rotorske rešetke

$$\bar{t}_{\text{opt},2} = 0,53$$

50. Duljina tetive profila rotorske rešetke

$$b_2 = 25,60 \text{ mm}$$

51. Stvarni optimalni korak rotorske rešetke

$$t_{2,\text{opt.}} = b_2 \cdot \bar{t}_{\text{opt},2} = 25,60 \cdot 0,53$$

$$t_{2,\text{opt.}} = 13,568 \text{ mm}$$

52. Broj lopatica rotorske rešetke

$$z_2 = \frac{d_{2s} \cdot \pi}{t_{2,\text{opt.}}} = \frac{804 \cdot \pi}{13,568}$$

$$z_2 = 185,466 \Rightarrow 186$$

53. Korigirani stvarni korak rotorske rešetke

$$t_{2\text{kor.}} = \frac{\pi \cdot d_{2s}}{z_2} = \frac{\pi \cdot 804}{186}$$

$$t_{2\text{kor.}} = 13,52 \text{ mm}$$

54. Korigirani relativni korak rotorske rešetke

$$\bar{t}_{2\text{kor.}} = \frac{t_{2\text{kor.}}}{b_2} = \frac{13,52}{25,60}$$

$$\bar{t}_{2\text{kor.}} = 0,528$$

55. Koeficijent gubitka rotorske rešetke

$$\zeta_R = 1 - \psi^2 = 1 - 0,93^2$$

$$\zeta_R = 0,1351$$

$\psi = 0,93$ – koeficijent gubitka brzine u rotorskoj rešetci

56. Kut stvarne relativne brzine toka pare na izlazu iz rotorske rešetke ($M_{2t} < 1$)

$$\sin \beta_2 = \sin \beta_{2E} \cdot \frac{\mu_2}{\psi} = \sin 27,28^\circ \cdot \frac{0,93}{0,93}$$

$$\beta_2 = 27,28^\circ$$

57. Stvarna relativna brzina toka pare na izlazu iz rotorske rešetke

$$w_2 = \psi \cdot w_{2t} = 0,93 \cdot 86,27$$

$$w_2 = 80,23 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

58. Gubitak u rotorskoj rešetci

$$\Delta h_{g,R} = \frac{w_{2t}^2}{2} \cdot (1 - \psi^2)$$

$$\Delta h_{g,R} = \frac{86,27^2}{2} \cdot (1 - 0,93^2)$$

$$\Delta h_{g,R} = 502,7 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 0,502 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

59. Stvarna apsolutna brzina toka pare na izlazu iz rotorske rešetke

$$c_2 = \sqrt{w_2^2 + u_2^2 - 2 \cdot u_2 \cdot w_2 \cdot \cos \beta_2}$$

$$c_2 = \sqrt{80,231^2 + 62,91^2 - 2 \cdot 62,91 \cdot 80,231 \cdot \cos 27,28^\circ}$$

$$c_2 = 37,72 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

60. Kut stvarne apsolutne brzine toka pare na izlazu iz rotorske rešetke

$$\alpha_2 = \arcsin \frac{w_2 \cdot \sin \beta_2}{c_2} = \arcsin \frac{80,231 \cdot \sin 27,28^\circ}{37,72}$$

$$\alpha_2 = 77,13^\circ$$

61. Gubitak uslijed izlazne brzine

$$\Delta h_{g,ib} = \frac{c_2^2}{2} = \frac{37,72^2}{2}$$

$$\Delta h_{g,ib} = 711 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 0,711 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

62. Stupanj djelovanja na obodu kola

$$\eta_u = 1 - \frac{\Delta h_{g,S} + \Delta h_{g,R} + \Delta h_{g,ib}}{\Delta h_{is}}$$

$$\eta_u = 1 - \frac{0,545 + 0,5027 + 0,711}{10,2956}$$

$$\eta_u = 0,8292 = 82,92 \%$$

63. Gubitak uslijed propuštanja kroz međustupanjsku brtvu

$$\zeta_b = \frac{d_b \cdot \pi \cdot \sigma_b}{F_1} \cdot \frac{\eta_u}{\sqrt{z}}$$

$$\zeta_b = \frac{0,4630 \cdot \pi \cdot 6,4 \cdot 10^{-4}}{0,061129} \cdot \frac{0,8292}{\sqrt{11}}$$

$$\zeta_b = 0,007 = 0,70 \%$$

$d_b = 463 \text{ mm}$ - odabrani promjer brtve

$\sigma_b = 0,64 \text{ mm}$ - zazor između brtve i osovine

$z = 11$ - broj šiljaka brtve

64. Gubitak uslijed trenja diska

$$\zeta_{tr} = 0,637 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{d_{1s}}{l_1} \cdot \frac{1}{\sin \alpha_1} \cdot \left(\frac{u}{c_F} \right)_{opt.}^3$$

$$\zeta_{tr} = 0,637 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{0,8019}{0,05536} \cdot \frac{1}{\sin 15^\circ} \cdot 0,49501^3$$

$$\zeta_{tr} = 0,0046 = 0,46 \%$$

65. Unutarnji stupanj djelovanja

$$\eta_i = \eta_u - \zeta_b - \zeta_{tr}$$

$$\eta_i = 0,8292 - 0,007 - 0,0046$$

$$\eta_i = 0,8176 = 81,76 \%$$

66. Iskorišteni toplinski pad stupnja

$$\Delta h_i = \eta_i \cdot \Delta h_{is} = 0,8176 \cdot 10,2956$$

$$\Delta h_i = 8,4176 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

67. Gubitak stupnja

$$\Delta h_g = (1 - \eta_i) \cdot \Delta h_{is}$$

$$\Delta h_g = (1 - 0,8176) \cdot 10,2956$$

$$\Delta h_g = 1,878 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

68. Stvarna entalpija pare na izlazu iz stupnja

$$h_{2i} = h_0 - \Delta h_i = 485,7006 - 8,4176$$

$$h_{2i} = 477,283 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Iz izračunatog tlaka i entalpije na izlazu iz stupnja proizlazi ulazno stanje pare slijedećeg stupnja.

5.2 Rezultati proračuna ostalih stupnjeva

	Stupanj	I.	II.	III.	IV.	V.
1.	n (o/min)	1500	1500	1500	1500	1500
2.	d _{1k} (m)	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
3.	d _{1s} (m)	0,8019	0,853	0,8235	0,836	0,854
4.	u ₁ (m/s)	62,95	63,253	64,677	65,67	66,14
5.	R _{sr}	0,1043	0,1101	0,1384	0,1565	0,1717
6.	(u/cF) _{opt.}	0,49501	0,4937	0,5046	0,5116	0,5273
7.	cF (m/s)	127,17	128,11	128,17	128,37	130,13
8.	Δh _{i,s} (kJ/kg)	10,2956	10,408	10,416	10,4407	10,663
9.	Δh _{s,i,s} (kJ/kg)	9,2213	9,2619	8,9742	8,807	8,502
10.	c _{1t} (m/s)	135,8	136,102	133,97	132,72	130,41
11.	h ₀ (kJ/kg)	485,7006	477,395	468,712	460,015	451,273
	p ₀ (bar)	8,5	6,43	4,91	3,75	2,888
	v ₀ (m ³ /kg)	0,042514	0,0582	0,0776	0,1021	0,1341
12.	p ₁ (bar)	6,618	5,05	3,877	3,02	2,34
	v _{1t} (m ³ /kg)	0,0561	0,0752	0,0991	0,1283	0,1651
13.	p ₂ (bar)	6,43	4,91	3,775	2,898	2,21
	v _{2t} (m ³ /kg)	0,0579	0,0774	0,1017	0,1337	0,1747
14.	a ₁ (m/s)	204,518	205,058	205,268	205,115	204,74
	κ	1,1259	1,1079	1,0968	1,0898	1,085
15.	M _{1t}	0,664	0,6637	0,653	0,647	0,637
16.	ε ₁	0,778	0,785	0,789	0,7974	0,8102
17.	ε ₁ *	0,5793	0,583	0,585	0,5868	0,5879
18.	F ₁ (m ²)	0,03607	0,0482	0,0645	0,0804	0,956
	μ ₁	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
19.	l ₁ (mm)	55,3	73,54	85,34	113,21	124,64
20.	profil lopatica SR	S-9015A	S-9015A	S-9015A	S-9018A	S-9018A
21.	α _u (°)	38	38	39	39	41
22.	t _{opt,l}	0,755	0,755	0,76	0,76	0,76
23.	b ₁ (mm)	51,46	51,46	51,46	51,46	47,15
24.	t _{1,opt.} (mm)	38,852	38,852	39,11	36,9	38,7
25.	z ₁	65	60	62	63	71
26.	t _{1kor.} (mm)	38,74	42,1688	41,72	41,69	38,64
27.	t̄ _{1kor.}	0,753	0,8194	0,8109	0,8103	0,819
28.	ζ _s	0,0591	0,0591	0,0591	0,0591	0,0591
29.	c ₁ (m/s)	131,73	131,253	129,92	129,12	127,11
30.	α _{1E=α1} (°)	15	15	15	15	15
31.	w ₁ (m/s)	72,77	72,08	70,544	67,82	63,35
32.	β ₁ (°)	27,28	28,29	30,64	29,42	31,11
33.	Δh _{g,s} (kJ/kg)	0,545	0,53	0,4929	0,451	0,4153
34.	Δh _{R,i,s} (kJ/kg)	1,074	1,146	1,452	1,6338	2,161
35.	w _{2t} (m/s)	86,27	86,257	88,781	88,7	91,8
36.	a ₂ (m/s)	204,53	205,05	205,16	205,03	204,58
	κ	1,1236	1,106	1,0962	1,089	1,084
37.	M _{2t}	0,421	0,422	0,433	0,437	0,448
38.	ε ₂	0,9716	0,9723	0,9737	0,9595	0,944

	Stupanj	I.	II.	III.	IV.	V.
39.	ε_2^*	0,5798	0,5833	0,5855	0,587	0,588
40.	$F_2 \text{ (m}^2\text{)}$	0,061129	0,0813	0,09838	0,1373	0,165
	μ_2	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
41.	$\Delta l \text{ (mm)}$	1,1	1,7	1,7	1,6	1,5
42.	$l_2 \text{ (mm)}$	56,46	75,23	86,5	105,43	130,24
43.	$d_{2k} \text{ (m)}$	0,748	0,748	0,748	0,748	0,748
	$\Delta l_k \text{ (mm)}$	1	1	1	1	1
44.	$d_{2s} \text{ (m)}$	0,8044	0,823	0,839	0,873	0,897
45.	$u_2 \text{ (m/s)}$	62,91	64,65	65,94	68,61	71
46.	$\beta_{2E}=\beta_2 \text{ (}^\circ\text{)}$	27,28	24,71	25,57	25,32	24,807
47.	profil lopatica RR	R-4629A	R-4629A	R-4629A	R-4629A	R-4629A
48.	$\beta_u \text{ (}^\circ\text{)}$	75	75	75	75	75
49.	$\bar{t}_{opt,2}$	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53
50.	$b_2 \text{ (mm)}$	25,60	25,60	25,60	25,60	25,60
51.	$t_{2,opt.} \text{ (mm)}$	13,568	13,568	13,568	13,568	13,462
52.	z_2	188	191	196	204	206
53.	$t_{2kor.} \text{ (mm)}$	13,52	13,52	13,52	13,52	13,4
54.	$\bar{t}_{2kor.}$	0,528	0,528	0,529	0,529	0,527
55.	ζ_R	0,1717	0,1578	0,1498	0,1403	0,1373
57.	$w_2 \text{ (m/s)}$	80,23	79,42	81,86	82,242	85,36
58.	$\Delta h_{g,R} \text{ (kJ/kg)}$	0,503	0,5907	0,5904	0,5518	0,57
59.	$c_2 \text{ (m/s)}$	34,52	34,03	36,21	35,64	36,39
60.	$\alpha_2 \text{ (}^\circ\text{)}$	77,13	81,3	79,82	77,28	76,54
61.	$\Delta h_{g,ib} \text{ (kJ/kg)}$	0,711	0,5791	0,6556	0,6351	0,6624
62.	$\eta_u \text{ (%)}$	82,92	83,67	83,43	84,83	84,66
63.	$\zeta_b \text{ (%)}$	0,70	0,5859	0,3341	0,2566	0,2
64.	$\zeta_{tr} \text{ (%)}$	0,46	0,4613	0,3279	0,32	0,2473
65.	$\eta_i \text{ (%)}$	81,76	81,4	82,77	83,74	84,22
66.	$\Delta h_i \text{ (kJ/kg)}$	8,4176	8,3808	8,687	8,742	9,025
67.	$\Delta h_g \text{ (kJ/kg)}$	1,878	1,9148	1,8086	1,698	1,691
68.	$h_{2i} \text{ (kJ/kgK)}$	477,284	468,702	460,015	451,273	442,247

	Stupanj	VI.	VII.	VIII.	IX.
1.	n (o/min)	1500	1500	1500	1500
2.	d_{1k} (m)	0,75	0,75	0,75	0,75
3.	ds₁ (m)	0,883	0,896	0,913	0,9531
4.	u₁ (m/s)	69,35	70,41	71,74	74,85
5.	R_{sr}	0,2133	0,2273	0,2436	0,2772
6.	(u/cF)_{opt.}	0,5251	0,5303	0,5403	0,5538
7.	cF (m/s)	132,07	132,79	132,79	135,17
8.	Δh_{i,s} (kJ/kg)	10,9226	11,017	11,017	11,3375
9.	Δh_{s,i,s} (kJ/kg)	8,5929	8,513	8,334	8,194
10.	c_{1t} (m/s)	131,094	130,487	129,1	128,018
11.	h_o	442,247	432,913	423,47	413,9118
	p_o	2,21	1,735	1,305	0,985
	v_o	0,1753	0,2221	0,2936	0,3857
12.	p₁	1,835	1,392	1,05	0,795
	v_{1t}	0,2098	0,2751	0,362	0,4734
13.	p₂	1,735	1,305	0,985	0,73
	v_{2t}	0,2215	0,2928	0,385	0,5136
14.	a₁ (m/s)	204,05	203,3	202,32	201,223
	κ	1,0816	1,0789	1,077	1,0758
15.	M_{1t}	0,642	0,641	0,638	0,6362
16.	ε₁	0,8303	0,8023	0,805	0,8071
17.	ε₁[*]	0,5886	0,589	0,5896	0,5898
18.	F₁ (m²)	0,1226	0,1543	0,1886	0,2512
	μ₁	0,97	0,97	0,97	0,97
19.	l₁ (mm)	146,5	163,4	201,3	287,65
20.	profil lopatica SR	S-9018A	S-9018A	S-9018A	S-9018A
21.	α_u (°)	41	42	42	42
22.	t̄_{opt,1}	0,76	0,76	0,76	0,76
23.	b₁ (mm)	47,15	47,15	47,15	47,15
24.	t̄_{1,opt.} (mm)	35,834	35,834	35,834	35,834
25.	z₁	75	78	81	84
26.	t̄_{1kor.} (mm)	35,564	35,651	35,426	35,645
27.	t̄_{1kor.}	0,754	0,754	0,751	0,756
28.	ζ_s	0,0476	0,0466	0,0455	0,0448
29.	c₁ (m/s)	126,424	126,54	125,61	124,79
30.	α_{1E}=α₁ (°)	15	16	15	15
31.	w₁ (m/s)	62,14	61,98	59,62	55,89
32.	β₁ (°)	32	34,25	33,156	35,1
33.	Δh_{g,s} (kJ/kg)	0,4078	0,3971	0,3789	0,3674
34.	Δh_{R,i,s} (kJ/kg)	2,33	2,504	2,683	3,1431
35.	w_{2t} (m/s)	92,32	94,07	94,23	97
36.	a₂ (m/s)	203,84	203	202	200,81
	κ	1,0811	1,078	1,0767	1,0756
37.	M_{2t}	0,453	0,463	0,4665	0,4831
38.	ε₂	0,9455	0,9375	0,9381	0,9182

	Stupanj	VI.	VII.	VIII.	IX.
39.	ε_2^*	0,5887	0,5892	0,5896	0,5899
40.	F_2 (m ²)	0,2183	0,2531	0,31168	0,3678
	μ_2	0,93	0,93	0,93	0,93
41.	Δl (mm)	1,7	1,5	1,1	1,7
42.	l_2 (mm)	160,43	201,45	217,87	252
43.	d_{2k} (m)	0,748	0,748	0,748	0,748
	Δl_k (mm)	1	1	1	1
44.	d_{2s} (m)	0,923	0,986	1,0486	1,134
45.	u_2 (m/s)	74,14	77,46	81,23	82,52
46.	$\beta_{2E}=\beta_2$ (°)	22,04	22,54	20,86	20,154
47.	profil lopatica RR	R-4629A	R-4629A	R-4629A	R-4629A
48.	β_u (°)	75	75	75	75
49.	$\bar{t}_{opt,2}$	0,53	0,53	0,53	0,53
50.	b_2 (mm)	25,60	25,60	25,60	25,60
51.	$t_{2,opt.}$ (mm)	13,568	13,568	13,568	13,568
52.	z_2	210	216	223	231
53.	$t_{2kor.}$ (mm)	13,54	13,53	13,54	13,54
54.	$\bar{t}_{2kor.}$	0,529	0,529	0,529	0,529
55.	ζ_R	0,1312	0,1284	0,1244	0,1224
57.	w_2 (m/s)	86,04	87,83	88,17	90,87
58.	$\Delta h_{g,R}$ (kJ/kg)	0,559	0,5676	0,5522	0,5757
59.	c_2 (m/s)	32,778	33,87	31,49	29,102
60.	α_2 (°)	79,43	81,98	82,343	79,46
61.	$\Delta h_{g,ib}$ (kJ/kg)	0,5372	0,5736	0,496	0,4235
62.	η_u (%)	86,22	86,04	87,05	87,95
63.	ζ_b (%)	0,1585	0,12	0,0913	0,07
64.	ζ_{tr} (%)	0,2366	0,2109	0,2169	0,1961
65.	η_i (%)	0,8583	0,8571	86,74	0,8768
66.	Δh_i (kJ/kg)	9,3743	9,4429	9,5566	9,9407
67.	Δh_g (kJ/kg)	1,548	1,5747	1,4611	1,396
68.	h_{2i} (kJ/kgK)	432,913	423,47	413,913	405,9

6. Zaključak

Geotermalna energija uz promišljeno korištenje predstavlja obnovljivi resurs koji nema većih utjecaja na okoliš. Iako je većinom vezana za geološki aktivna područja iskorištavanjem srednje i nisko -temperaturnih izvora postala je važan dio, te je rasprostranjena u svim dijelovima svijeta, njen razvoj i uporaba se ubrzavaju čime predstavlja jedan od glavnih istraživačkih pravaca u energetici.

U Republici Hrvatskoj postoji nekoliko obećavajućih geotermalnih izvora na kojima je moguća proizvodnja električne energije, a među njih spada i geotermalno polje Slatina. Provedenom analizom mogućih tehnologija koje su iskoristive na geotermalnom izvoru ustanovljeno je da je najpovoljnija tehnologija za dane parametre geotermalnog izvora ORC.

Za odabrano postrojenje napravljen je termodinamički i aerodinamički proračun turbine te konstruiran uzdužni presjek parne turbine.

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija – Uzdužni presjek turbine u A0 formatu

LITERATURA

- [1] DiPippo R. *Geothermal Power Plants – Principles, Applications and Case Studies*. Oxford: Elsevier Ltd, 2005.
- [2] Geotermalna energija, <http://www.obnovljivi.com/geotermalna-energija/69-nacini-pretvorbe-geotermalne-energije-u-elektricnu-energiju?start=1>
- [3] I. Samodol i p. Zvonimir Guzović, Diplomski rad, Zagreb, 2008.
- [4] Koncept izvodljivosti, strategija i ciljevi geotermalnih istraživanja na području grada Slatine, Geoslatina d.o.o, 2010. God
- [5] Nacionalni energetska program za korištenje geotermalne energije – GEOEN, <http://www.eihp.hr/hrvatski/geoen-kop.htm#geoen>
- [6] http://hr.wikipedia.org/wiki/Tektonika_plo%C4%8Da
- [7] Toplinske tablice, FSB, Zagreb, 2007.
- [8] <http://www.obnovljivi.com/geotermalna-energija>
- [9] Guzović Z. *Podloge za vježbe iz predmeta Turbostrojevi II*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1994.
- [10] Guzović Z. *Konstrukcija i proračun čvrstoće elemenata parnih i plinskih turbina*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1994.
- [11] www.eere.energy.gov/geothermal/powerplants
- [12] www.eihp.hr